

## **Biorrefinarias, biocombustíveis e química renovável: revolução tecnológica e financiamento**

Valéria Delgado Bastos

<http://www.bndes.gov.br/bibliotecadigital>

# **Biorrefinarias, biocombustíveis e química renovável: revolução tecnológica e financiamento**

**Valéria Delgado Bastos\***

## **Resumo**

A inovação e o ritmo do progresso tecnológico têm sido condicionados cada vez mais por novos desafios econômicos e ambientais relacionados à crescente demanda por matérias-primas e energia. Uma parte das novas tecnologias baseadas em recursos renováveis envolve o conceito de biorrefinarias, onde seriam fabricados biocombustíveis, energia e produtos químicos de base renovável. Muitas dessas inovações teriam origem em plataformas da biotecnologia

---

\* Economista do BNDES. Este artigo baseia-se em *paper* aprovado na 14ª Conferência da International Schumpeterian Society, realizada de 2 a 5 de julho de 2012, em Brisbane, Austrália [Bastos (2012a)]. O artigo é de exclusiva responsabilidade da autora, não refletindo, necessariamente, a opinião do BNDES.

industrial, originadas de empresas de base tecnológica, principalmente *start-ups* americanas. As inovações de biorrefinarias podem ser o embrião de uma nova revolução tecnológica caracterizada por um novo paradigma tecnoeconômico e um papel complementar do financiamento. Este artigo analisa as experiências de biorrefinarias nos Estados Unidos e no Brasil, com base na hipótese de revoluções tecnológicas e no papel complementar do financiamento, em especial do suporte governamental.

## **Abstract**

The growing demand for raw materials and energy has posed new economic and environmental challenges, which have increasingly determined innovation and the pace of development in technology. Part of the new technologies based on renewable resources involves the concept of bio-refineries, which would produce bio-fuels, energy and renewable chemical products. Many of these innovations would arise from industrial biotechnology platforms, originating from technology-based companies, mainly American start-ups. Bio-refinery innovations may be the embryo of a new technological revolution characterized by both a new techno-economic paradigm and the complementary role of financing. This paper analyzes the experience of bio-refineries in the United States and Brazil based on the hypothesis of technological revolutions and on the complementary role of financing, especially governmental support.

## Introdução

Desde o começo do século XXI, a economia mundial enfrenta novos desafios. Um dos principais deles tem relação com o impressionante crescimento das economias emergentes, com destaque para China e Índia, em contraste com ritmo mais modesto das economias desenvolvidas, o que tem reflexos na expressiva demanda por matérias-primas e energia. Outro desafio corresponde à forma de coordenar a expansão da produção global com altos e voláteis preços do petróleo e o esgotamento de reservas e a preocupação mundial sem precedentes com danos ambientais e compromissos de redução de gases de efeito estufa.

O enfrentamento das questões ambientais depende principalmente do ritmo da inovação e do progresso tecnológico, que tem estado fortemente condicionado por esses desafios.

Com o surgimento de novas tecnologias baseadas em recursos renováveis, diversos países têm empregado o conceito de biorrefinaria, arquétipo de uma nova economia verde ou ambientalmente correta. Nas biorrefinarias, seriam produzidos biocombustíveis, energia e produtos químicos de base renovável. Muitas das inovações nas biorrefinarias teriam origem em plataformas da biotecnologia industrial, originadas de empresas de base tecnológica, *start-ups* americanas. Tais firmas, ainda que tenham forte base científica, são inexperientes em plantas de produção industrial e carentes de capacidade financeira.

Até recentemente, fundos de capital de risco (*venture capital*) constituíram importante base de *funding* das empresas de biotecnologia. No entanto, as biorrefinarias têm características muito distintas de outras indústrias que têm estado fortemente baseadas na biotecnologia, como a produção de biofármacos. Nas biorrefinarias, são produzidas, em geral, *commodities*, como os biocombustíveis, com padrão de competição por preços (ao contrário de fármacos, em que a competição é por inovação e diferenciação). Além disso, por questões de escala, as biorrefinarias exigem atividades de escalonamento (*scaling-up*) de plantas, com implicações importantes relativas a porte, gastos e estrutura de pesquisa e desenvolvimento, envolvendo até mesmo unidades de demonstração, dentro do conceito moderno

de pesquisa, desenvolvimento e demonstração (P,D&D). Ademais, inovações e investimentos em “energia limpa” (ou verde ou renovável) têm características de bem quase público, cujo incentivo depende da incorporação do retorno social aos convencionais cálculos de retorno privado por meio da regulação.

Nesse sentido, as tecnologias compreendidas nas biorrefinarias não parecem prescindir de um nível sem precedentes de suporte financeiro dos governos, conforme evidenciado pela crise financeira de 2008. Com a crise, os canais de financiamento para esse tipo de inovação virtualmente desapareceram, mesmo para os projetos mais promissores e prontos para comercialização. Desde então, o suporte federal tornou-se fonte fundamental, sugerindo a necessidade de redefinição da forma de financiamento.

Uma boa evidência do apoio federal destinado a esse fim foi a parcela dos recursos do American Recovery and Reinvestment Act (ARRA 2009) e a revisão do programa original de subvenção às biorrefinarias do Departamento de Energia dos Estados Unidos, que, além dos biocombustíveis, passou a contemplar a produção de químicos *bio-based*. Essa inclusão é crucial para o esforço de escalonamento e comercialização (pioneira) das inovações, uma vez que, embora *equity* e capital de risco estivessem disponíveis para estimular a inovação, poucas opções de *funding* existiam (mesmo pré-crise) para a construção de plantas de escala pré-comercial ou demonstração. De fato, um amplo conjunto de instrumentos e arranjos institucionais foi desenvolvido pelo governo americano com vistas ao apoio dessas tecnologias, particularmente focado na meta de alcançar a viabilidade e o sucesso comercial das biorrefinarias.

As biorrefinarias podem estar no embrião de uma nova revolução tecnológica, na linha proposta por Perez (2004), na qual o financiamento tem papel complementar e indispensável para a inovação. A decisão de financiar inovações requer uma postura financeira mais arriscada do que a mera intermediação financeira e é guiada pelo mesmo paradigma tecnoeconômico das revoluções tecnológicas, embora com postura mais volátil, flexível e menos arraigada que o capital produtivo quando surgem sinais de exaustão de determinado paradigma [Perez (2004)].

O suporte ativo do governo americano no período de instalação das biorrefinarias corrobora a hipótese do papel dos governos na implantação de tecnologias limpas, contrariando a hipótese de Perez de um papel mais passivo dos governos nessa fase de instalação [Perez (2004; 2010a)].

Desde meados dos anos 1970, o Brasil desenvolveu uma forte indústria de etanol combustível, graças a vantagens competitivas provenientes de vantagens naturais, bem como de inovações incrementais e crescente produtividade agrícola, possibilitadas por melhoramentos genéticos da cana-de-açúcar, além da melhoria da eficiência na síntese industrial do etanol.

Embora o Brasil tenha trilhado uma longa e exitosa jornada com o etanol biocombustível, a química verde, de produtos químicos baseados no etanol (ou no açúcar), não teve a mesma sorte. Contudo, a crescente demanda por produtos químicos e a insuficiente oferta doméstica da indústria petroquímica baseada na nafta, aliadas às vantagens competitivas dinâmicas do setor sucroenergético, abrem uma avenida de oportunidades e criam enorme potencial para o desenvolvimento da química verde no Brasil.

A estratégia de agregação de valor e sofisticação aos recursos naturais é uma forma de promover não apenas *catching up*, mas até mesmo de alcançar a fronteira tecnológica em certas áreas, almejando competitividade em mercados mundiais [Perez (2010b)]. O desenvolvimento da cadeia de valor da cana-de-açúcar depende de uma estratégia mais ampla de crescimento *research-based* que passe a incluir esforços de desenvolvimento de indústrias e tecnologias. Isso implica desafios no plano das políticas tecnológica e industrial e instrumentos adequados de apoio governamental, como o desenvolvimento de formas especiais de instituições para lidar com a incerteza da inovação.

O propósito principal deste artigo é analisar o potencial de biorrefinarias e química verde no Brasil, com base na hipótese de revoluções tecnológicas de Perez, além do papel do apoio financeiro governamental, inspirado na ampla rede de apoio federal às biorrefinarias

desenvolvida nos Estados Unidos. O trabalho focaliza políticas, instrumentos e oportunidades de desenvolvimento das biorrefinarias nos Estados Unidos e no Brasil, os dois países líderes na produção de etanol, responsáveis por mais de 80% da oferta mundial. De um lado, o governo americano tem desempenhado o papel mais ativo na indústria de biocombustíveis e tem erigido um amplo conjunto de instrumentos visando ao desenvolvimento de biocombustíveis e químicos *bio-based*. De outro lado, o sucesso brasileiro com combustíveis provenientes da cana-de-açúcar, por meio de inovação incremental e base industrial consolidada, qualifica o país a fazer parte da corrida tecnológica em direção a combustíveis e químicos de geração avançada.

O artigo está estruturado da seguinte forma. A seção seguinte apresenta a abordagem teórico-conceitual de uma iminente sexta revolução tecnológica. A terceira seção aborda o conceito de biorrefinaria, as promissoras rotas tecnológicas em desenvolvimento e os mecanismos de financiamento e apoio governamental nos Estados Unidos. Na quarta seção descreve-se a exitosa experiência brasileira com etanol, bem como os instrumentos e oportunidades na corrida mundial da fronteira tecnológica. Na última seção, são apresentadas as principais conclusões do trabalho.

## **Revoluções tecnológicas, paradigmas e financiamento**

Schumpeter pôs a inovação tecnológica como peça central da dinâmica das economias de mercado por meio do processo de destruição criadora. Firms inovam em busca de lucros extraordinários e participações no mercado, “convertendo” conhecimento científico em novos e melhorados produtos, processos e sistemas. Empregam para tal pesquisa e desenvolvimento (P&D) intrafirma de forma sistemática e realizam, usualmente, pesados investimentos em unidades de pesquisa, tais como laboratórios, plantas-piloto e plantas de demonstração.

Embora as firmas sejam o *locus* da inovação, existem numerosas interações e *feedbacks* que cercam o processo de inovação e sua difusão, dando lugar a redes sistemáticas de inovação e cooperação entre universidades e instituições de pesquisa com firmas [Freeman (1996)]. O reconhecimento da importância de interdependências e interações entre diversos atores para a inovação resultou no desenvolvimento do conceito de sistema nacional de inovação (SNI) – termo formalmente cunhado por Lundvall (1992) e Nelson (1993) com base nas ideias precursoras de Freeman – e mesmo de sistemas setoriais específicos de inovação [Malerba (2004)].

Admitir a importância dessa rede ampla não elimina, contudo, o entendimento de que o mercado continua a ser o “reinado” da inovação e de firmas (frequentemente) como atores líderes. Decisões de investir em inovação são similares às decisões de investir em nova capacidade produtiva, sujeitas à mesma sorte de incertezas, ainda que de forma ampliada,<sup>1</sup> tomadas, em grande medida, como resultado do *animal spirits* keynesiano [Freeman (1974)]. Investimentos em inovação consideram expectativas não apenas sobre o retorno financeiro, mas também sobre o comprometimento de gastos e o tempo até o sucesso comercial (ou não) da inovação. Como investimento significa longo prazo e comprometimento irreversível de fluxos de caixa, com base em posturas especulativas, a decisão de investir baseia-se em como financiá-lo. A natureza particular do investimento em inovação sustenta o consenso, mesmo no *mainstream economics* (nesse caso, por falhas de mercado e externalidades e o *gap* entre retornos sociais e privados), de que a inovação e as atividades de P&D não podem ser deixadas exclusivamente com o setor privado, sob o risco de subinvestimento, o que justifica a intervenção governamental na forma de apoio a P&D.

Economias de mercado são guiadas pelo progresso técnico, e sua dinâmica está intrinsecamente relacionada à dinâmica das inovações,

---

<sup>1</sup> A maior incerteza que ronda a inovação compreende a incerteza geral dos negócios – aplicada a todas as decisões sobre o futuro – comum a qualquer investimento, mas também incertezas técnicas e de mercado no sentido do sucesso comercial de uma inovação, não apenas quanto à questão de funcionar ou não funcionar, mas também a que custo [Freeman (1974)].



assim explicando o ciclo econômico – na versão de Schumpeter ou dos ciclos longos da abordagem de Kondratieff. Conforme Perez (2004), as inovações (mesmo as radicais) não são eventos isolados, mas ocorrem em *clusters* e compreendem um conjunto de inovações inter-relacionadas. Revoluções tecnológicas fornecem tecnologias genéricas que afetam toda a estrutura econômica e dão lugar a novos paradigmas tecnoeconômicos – que são um conjunto de rotinas para a economia por meio das quais as novas tecnologias genéricas se difundem por todo o cenário produtivo [Perez (2004)].

A autora enfatiza a importância de empregar o termo “ondas” por “marés” – definido como o processo pelo qual uma revolução tecnológica e um novo paradigma tecnoeconômico propagam-se pela economia e por meio do qual ocorrem mudanças profundas não só no nível econômico, mas também no social. Não obstante, uma “grande maré de desenvolvimento” começa com o surgimento de *breakthrough* tecnológico (um *big bang*).

A economia mundial deparou-se com cinco revoluções tecnológicas e cada uma delas deu lugar a um conjunto de novas indústrias, princípios organizacionais, infraestrutura e um estoque de conhecimento que promoveu a modernização das indústrias existentes [Perez (2010a)], conforme Tabela 1. O veículo da mudança é um novo paradigma tecnoeconômico – que emerge da implementação prática das novas tecnologias e incorpora novos critérios do senso comum sobre processos, organizações produtivas e comportamento de mercados que seriam os mais eficientes e lucrativos.

A mesma autora confere um papel indispensável e complementar ao financiamento para a inovação, que requer posturas financeiras mais arriscadas do que simples rotinas de intermediação. Como previamente argumentado por Freeman (1974), instituições financeiras especiais foram desenvolvidas para lidar com o tipo especial de incerteza da inovação.

Na abordagem de Perez, decisões de financiar inovações são guiadas pelo mesmo paradigma tecnoeconômico das inovações, principalmente no caso de inovações radicais que exigem

“*bold and risk-loving bankers*”. Esse papel especial é atribuído, invariavelmente, aos mercados de capitais por sua postura intrinsecamente de risco comparada a bancos tradicionais e seu comprometimento com cálculos de risco convencionais.

Tabela 1  
Revoluções tecnológicas e períodos de difusão

Revolução tecnológica	Difusão ocorre em dois períodos			
	<i>Big bang</i>	Período de instalação	<i>Turning point</i>	Período de operação
Primeira: a partir de 1771 <b>A Revolução Industrial</b> (Inglaterra)	1771	1770s-1790s	1793-1797	1798-1829
Segunda: a partir de 1829 <b>Era das ferrovias e do vapor</b> (Inglaterra, espalhando-se para o continente e EUA)	1829	1830s-1840s	1848-1850	1850-1873
Terceira: a partir de 1875 <b>Era do aço, da eletricidade e da engenharia pesada</b> (EUA e Alemanha, suplantando Inglaterra)	1875	1875-1893	1893-1895	1895-1918
Quarta: a partir de 1908 <b>Era do petróleo, dos automóveis e da produção em massa</b> (EUA, espalhando-se para a Europa)	1908	1908-1929	1929-1933 Europa 1929-1943 EUA	1943-1974
Quinta: a partir de 1971 <b>Era da informação e das telecomunicações</b> (EUA, espalhando-se para Europa e Ásia)	1971	1971-2001	2001-??	2001-...
Sexta: a partir de 2005 <b>Era da economia verde</b> (EUA? Emergentes?)	2005?	2005-...	?	?

Fonte: Elaboração própria, com base em dados de Perez (2004).

A transição de uma revolução tecnológica para outra não ocorre de forma simples e linear, mas engendra processos complexos decorrentes de uma inércia econômica e institucional profundamente enraizada e expressa no paradigma precedente. A resistência das firmas à mudança é explicada pelo fato de que a trajetória precedente, mesmo em exaustão, está incorporada em investimento de longo prazo nos equipamentos existentes, em estruturas, conhecimento e redes constituídas de clientes e fornecedores. O capital financeiro,

por seu turno, na busca de retornos de curto prazo, é mais flexível, rapidamente mutável e menos comprometido quando emergem sinais de exaustão, uma vez que suas decisões se baseiam em critérios de julgamento sobre qual inovação é provável de ser bem-sucedida e não estão atreladas à propriedade de estruturas (unidades) físicas existentes [Perez (2004; 2010a)].

Segundo Perez (2010a), a difusão das revoluções tecnológicas compreende dois períodos distintos: um período de “instalação”, caracterizado por esforços para superar a resistência do antigo paradigma arraigado em instalações físicas e arranjos institucionais e legais; e um período de operação/exploração, no qual ocorre a consolidação do novo paradigma. Embora o primeiro período comece com as inovações por parte das firmas, o capital financeiro assumiria, de forma crescente, um papel de liderança,<sup>2</sup> ao passo que a liderança do período de “exploração” recai indiscutivelmente no capital produtivo, enquanto o financeiro apenas se adapta (até que esse novo paradigma mostre sinais de exaustão e outro surja).

No período de instalação, os atores ativos seriam os novos empresários empreendedores e o capital financeiro, sendo atribuído ao governo um papel passivo. O papel mais importante do governo seria desempenhado, sim, na transição para o segundo estágio e na operação do novo paradigma, quando uma profunda reconstrução institucional é requerida e serve como guia da inovação pelo capital produtivo, com um papel de suporte financeiro atribuído ao capital financeiro.

Atualmente, o mundo estaria, segundo Perez (2010a; 2011), na transição para uma nova revolução tecnológica, a sexta, caracterizada como a era da biotecnologia, da nanotecnologia, da bioeletrônica e dos novos materiais. Avanços nessas tecnologias radicalmente novas, que já estão em gestação, poderão se tornar *breakthroughs* e definirão a próxima revolução tecnológica, embora ainda não seja possível prever quais tecnologias prevalecerão.

---

<sup>2</sup> Por exemplo, no período de instalação da quinta revolução tecnológica, o capital de risco dos Estados Unidos teria apoiado de 85% a 90% das firmas de tecnologia de informação e comunicação [Perez (2010a)].

De todo modo, biocombustíveis de segunda geração, químicos baseados em recursos renováveis e baseados em técnicas da biotecnologia, em biorrefinarias, são os possíveis carros-chefe da próxima revolução. Desde o começo dos anos 2000, a economia mundial tem enfrentado novos desafios relacionados a questões econômicas e ambientais que, de forma crescente, têm guiado a inovação e novas tecnologias, como energia renovável, biologia sintética, bioinformática, captura e conservação de carbono.

Tecnologias limpas ou “verdes” compreendem um amplo conjunto de diferentes tecnologias com objetivos distintos com respeito à redução da poluição, à eficiência de recursos e à mitigação da mudança climática. Algumas dessas novas tecnologias ainda estão em fase de pesquisa e desenvolvimento (P&D), guiadas por requisitos ambientais, mas, cada vez mais, também por determinantes econômicos, uma vez que respondem a desafios para a forte expansão da demanda por fontes de matérias-primas e energia, como são fontes de crescimento econômico potencial e lucros extraordinários da inovação em uma nova revolução tecnológica.

Inovações *environment-driven* assumem características de bem quase público, caracterizadas por dupla externalidade: externalidade ambiental e externalidade de conhecimento, relacionadas a falhas de mercado. As falhas de mercado relacionadas ao conhecimento decorrem de apropriabilidade parcial do retorno/resultados do investimento pelos atributos de bem público do conhecimento que levam a subinvestimento; e assimetrias de informação entre investidores e financiadores acerca do entendimento sobre a inovação antes de sua comercialização, o que restringe o acesso às tradicionais fontes de financiamento e leva a *gaps* de *funding* e subinvestimento em inovações com alto retorno social. Além disso, essas tecnologias são também caracterizadas por externalidades ambientais, uma vez que beneficiam toda a sociedade, mesmo além das fronteiras nacionais [Dutz e Sharma (2012)]. Os benefícios potenciais das tecnologias “verdes” para todo o mundo refletem-se na crescente colaboração das inovações.

Esse caráter de bem público (ou quase público) poderia engendrar dimensões novas da próxima revolução tecnológica quando

comparada às precedentes: (a) dado seu mais alto retorno social (e global), elas requerem uma abordagem diferente (e mais ativa) do governo, não apenas em âmbito nacional, como em sentido global, mesmo no período de instalação, por meio de envolvimento direto e *funding* a P&D e um arranjo mais amplo de incentivos à inovação; (b) um consequente papel distinto do capital produtivo e, em especial, do capital financeiro; e (c) dados os arcabouços institucionais e legais exigidos pela inovação e pela adoção de tecnologias limpas, uma situação sem precedentes poderia ser criada, na qual o paradigma tecnoeconômico precederia o *big bang* e o período de instalação.

### **Tecnologias verdes e limpas, biorrefinarias, biocombustíveis e químicos renováveis**

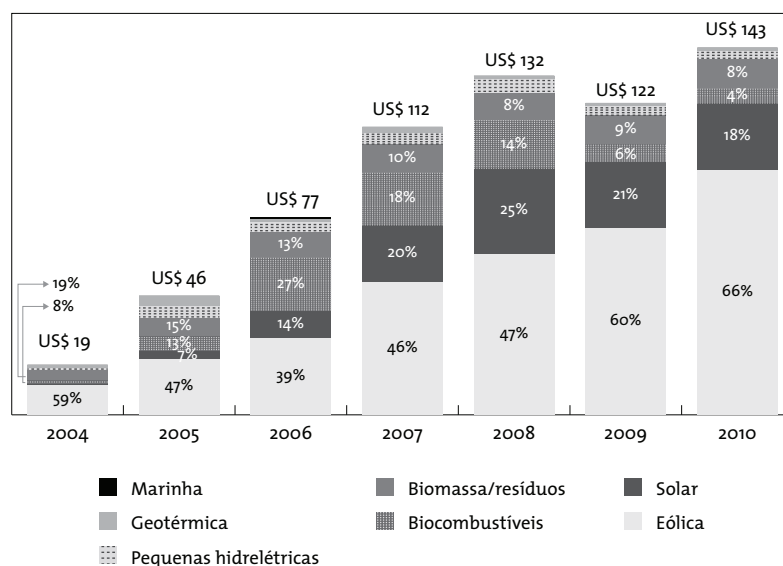
De acordo com Unep (2011), o investimento global em tecnologias limpas tem crescido desde 2004, alcançando números recordes de US\$ 211 bilhões em 2010 (além de US\$ 58 bilhões em fusões e aquisições). Em relação a “financiamento de novo investimento” (que cobre transações de investidores em projetos que vão desde a pesquisa até a implantação de capacidade produtiva), tem havido uma mudança em direção aos países em desenvolvimento, parcialmente explicada pelos elevados investimentos recentes da China – que respondeu por 34% do investimento de US\$ 143 bilhões em 2010 (82% do total da Ásia). A maior parte desse investimento foi dirigida à energia eólica (66%), seguida de solar (18%), em 2010. Os biocombustíveis perderam participação no total (de 13%, em 2005, para 4%, em 2010, e queda em valores absolutos, registrando US\$ 5,5 bilhões em 2010), da mesma forma que as tecnologias de conversão de biomassa e resíduos (de 15% para 8%, no período, mas mantendo o mesmo patamar de investimentos desde 2007 em US\$ 11 bilhões anuais), conforme Gráfico 1. Em P&D, os investimentos, público e empresarial, somaram US\$ 8,6 bilhões, em 2010.

Os países desenvolvidos ainda são líderes na inovação em tecnologia verde e limpa – Japão, Alemanha e Estados Unidos respondem por 60% dessas inovações no mundo –, embora um pequeno grupo de nove economias emergentes (incluindo China, Brasil e Índia)

responda por 80% de todas as patentes verdes concedidas a países em desenvolvimento em 2006-2010 [Dutz e Sharma (2012)]. Como percentagem do PIB, oito principais países destacam-se em investimentos em energia limpa, conforme números de 2009 divulgados pelo secretário de energia dos Estados Unidos em seminário de avaliação da política de energia americana [Chu (2011)] (Gráfico 2).

Gráfico 1

Financiamento de novo investimento em energia renovável, por tipo de tecnologia – 2004-2010 – (em US\$ bilhões e percentagem)



Fonte: Unep (2011).

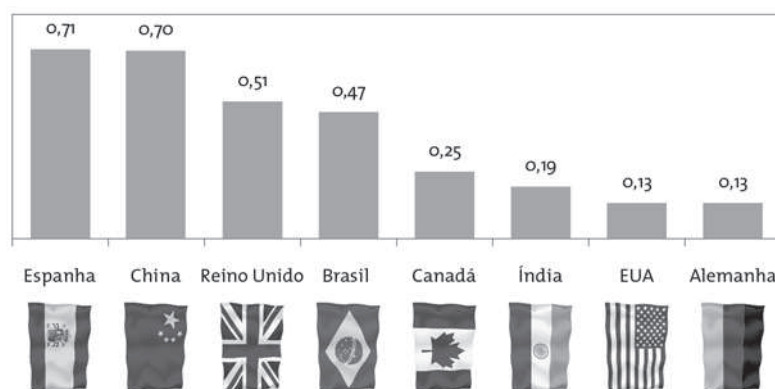
Neste artigo, interessam particularmente as tecnologias limpas relacionadas à biomassa, sob o guarda-chuva das chamadas biorrefinarias, que representam a alternativa renovável aos recursos fósseis para produção de biocombustíveis, energia e química verde.<sup>3</sup> Atualmente,

<sup>3</sup> De acordo com EPA (2006), “química verde”, também conhecida como química sustentável, corresponde ao desenvolvimento de produtos e processos químicos que mitiguem ou eliminem a emissão de substâncias nocivas ao meio ambiente por meio do emprego de um conjunto de princípios e metodologias para redução da poluição na origem.

as biorrefinarias podem envolver um amplo conjunto de possíveis tecnologias, não havendo (ainda) uma rota dominante, com muitas oportunidades de inovação. Muitas tecnologias em desenvolvimento empregam conhecimento científico altamente sofisticado proveniente de diversas áreas, notadamente biotecnologia moderna, que podem ser pioneiras na próxima revolução tecnológica.

Gráfico 2

**Investimentos em energia limpa como porcentagem do PIB – principais países (2009)**



Fonte: Chu (2011).

### **Biorrefinarias, biocombustíveis e químicos *bio-based***

De acordo com o National Renewable Energy Laboratory (NREL) dos Estados Unidos, uma biorrefinaria é uma unidade que integra os processos de conversão da biomassa e equipamento para produzir múltiplos combustíveis, químicos e energia. Biomassa é a matéria orgânica que pode ser convertida em energia. É matéria heterogênea e quimicamente complexa que contém todos os elementos encontrados nos recursos fósseis [Bastos (2007)]. As biorrefinarias têm sido consideradas similares em conceito às refinarias de petróleo, embora usem matéria biológica como matéria-prima, em vez de pe-

tróleo.<sup>4</sup> Entretanto, enquanto as refinarias de petróleo nasceram como clássicos laboratórios químicos, as biorrefinarias baseadas na biomassa nascem da interface da engenharia, da química e da biotecnologia.

O conceito apareceu pela primeira vez na lei agrícola americana em 2002 (Farm Bill), incluindo unidades, equipamentos e processos para converter biomassa em biocombustíveis, energia e químicos, em vez de simples unidades isoladas que produzem um único produto, mesmo que baseado em matéria-prima renovável. Em 2005, o Programa Plurianual de Biomassa do Departamento de Energia dos Estados Unidos expandiu o conceito para incluir unidades que usam biomassa lignocelulósica<sup>5</sup> para produção de biocombustíveis e químicos e geração de energia em uma combinação ótima que maximize o retorno do investimento.

As refinarias de petróleo dão origem a um conjunto diversificado de produtos, processados em várias unidades industriais exigidas para alcançar sua total viabilidade econômica: combustíveis, que costumam ter preços mais baixos, mas mercados mais amplos e com fortes economias de escala; e produtos químicos, que, em geral, compreendem mercados menores, mas preços e margens de lucros elevados.<sup>6</sup>

É um conceito ainda em construção, que inclui, atualmente, diferentes fontes de matéria-prima (*feedstock*) e tecnologias de conversão. A situação atual pode ser caracterizada como uma verdadeira corrida tecnológica [Chu (2011)], na qual existem muitas apostas, mas grandes incertezas sobre qual matéria-prima e qual tecnologia serão

<sup>4</sup> Arora e Gambardella (2010) enfatizam o caráter disruptivo de tecnologias subjacentes às biorrefinarias, mas argumentam que constituiriam um novo paradigma tecnológico e industrial, com uma provável configuração distinta das refinarias de petróleo.

<sup>5</sup> A biomassa lignocelulósica (plantas energéticas, tais como *switchgrass*, resíduos agrícolas e florestais, tais como biomassa florestal, forragem de cereal, palha do trigo, bagaço e palha da cana, além de resíduos sólidos urbanos e outras fontes) é composta de celulose, hemicelulose e lignina. É o composto orgânico mais abundante na biosfera (cerca de 50% da biomassa terrestre) e, assim, a fonte de carbono mais abundante e renovável do planeta, estimada entre seiscentos milhões e oitocentos milhões de toneladas anualmente, apenas nos Estados Unidos.

<sup>6</sup> Uma refinaria convencional produz químicos de alto valor agregado em cerca de 5% do volume [IEA (2009)].



vencedoras, tornando-se um *breakthrough* comercialmente bem-sucedido. O maciço apoio do governo americano até recentemente às biorrefinarias e à corrida tecnológica da biomassa significa que são consideradas prioridade nacional [State of the Union de 2011].<sup>7</sup>

Atualmente, há (pelo menos) quatro tipos de biorrefinarias, conforme o tipo de biomassa (*feedstock*):<sup>8</sup>

- biorrefinarias verdes: baseadas em biomassa verde (gramíneas, cereais imaturos etc.);
- biorrefinarias de planta inteira (*whole crop*): baseadas em grãos comestíveis (fontes de amido);
- biorrefinarias lignocelulósicas: baseadas em matéria-prima lignocelulósica; e
- biorrefinarias aquáticas: baseadas na biomassa das algas.<sup>9</sup>

Muitos investimentos em biorrefinarias têm sido conduzidos por meio de parcerias estratégicas e *joint ventures* entre empresas líderes químicas e do petróleo, ou ainda firmas produtoras de alimentos e matérias-primas de biomassa, com firmas desenvolvedoras de processos biotecnológicos, abrindo possibilidades de cadeias de valor completamente novas na indústria química.

De fato, P&D e inovação em combustíveis avançados e químicos *bio-based* englobam redes amplas de universidades, institutos de pesquisa e, dependendo de especificidades nacionais, também laboratórios governamentais. Nos Estados Unidos, alguns dos

<sup>7</sup> Disponível em: <<http://www.whitehouse.gov/state-of-the-union-2011>>. Acesso 23.2.2012.

<sup>8</sup> A respeito da tipologia de biorrefinaria, ver o European Star-Colibri project (Strategic Research Targets for 2020 – Collaboration Initiative on Biorefineries): <<http://www.star-colibri.eu/>>. IEA (2009) tem uma classificação alternativa. No entanto, são nomes diferentes para ideias praticamente idênticas.

<sup>9</sup> A biomassa de algas contém tanto hidrocarbonetos quanto açúcar – cuja composição depende das espécies e do ambiente em que são cultivadas –, conversíveis em muitos produtos diferentes por meio de distintas tecnologias (bioetanol, biodiesel, bioquerosene de aviação etc.). Algumas espécies de algas têm alta preferência por lipídios como material de armazenagem e outras se tornam ricas em amido e açúcares. No momento presente, a pesquisa em algas no mundo concentra-se no desenvolvimento de tecnologias de colheita viáveis e na otimização de tecnologias de refino para os produtos finais (ver <<http://algaebiofuels.com>>).

17 laboratórios do Departamento de Energia (US DOE) estão diretamente envolvidos no desenvolvimento de biocombustíveis avançados, entre os quais o NREL e o Oak Ridge National Laboratory. Para acelerar a pesquisa a fim de enfrentar os desafios biológicos e o custo-efetividade da tecnologia de biocombustíveis avançados, foram criados três novos centros de pesquisa em bioenergia em 2007, com investimentos do DOE de US\$ 400 milhões (em cinco anos). São eles: o Joint BioEnergy Institute (JBEI), vinculado ao Lawrence Berkeley National Laboratory; o BioEnergy Science Center (BESC), liderado pelo Oak Ridge National Lab; e o Great Lakes Bioenergy Research Center (GLBRC), ligado à University of Wisconsin-Madison e com fortes vínculos com a Michigan State University. O papel especial do arranjo institucional norte-americano pode ser mais bem compreendido se for considerado que um dos diretores do JBEI desenvolveu na University of California Berkeley uma das mais promissoras rotas tecnológicas de biocombustíveis de nova geração e, ao mesmo tempo, foi o cofundador de duas promissoras *start-ups* em biotecnologia da área, Amyris e LS9, além da Lygos, a primeira empresa *spin out* do JBEI.<sup>10</sup>

Muitos dos atores mais inovadores e *fast movers* no campo de biorrefinarias são firmas americanas *start-ups* de biotecnologia industrial (Tabela 2). Essas firmas de biotecnologia – fortemente vinculadas a universidades e laboratórios públicos – estão cada vez mais envolvidas no desenvolvimento de biocombustíveis e químicos renováveis.

De fato, os crescentes custos da inovação e a incerteza acerca de seu sucesso comercial, juntamente com dificuldades relacionadas à apropriabilidade dos resultados de inovações “ambientalmente orientadas” – que assumem características de bens quase públicos –, são razões para crescente colaboração em P&D. A pesquisa cooperativa envolve firmas, universidades, institutos de pesquisa e laboratórios públicos, o que promove uma forma de *brain bridge* e começa a erodir fronteiras nacionais na busca da inovação tecnológica. Com isso, são requeridos novos arranjos institucionais com vistas a lidar com o amplo conjunto de alianças e parcerias internacionais que

<sup>10</sup> Ver <<http://energy.gov/offices#Labs&TechnologyCenters>>.

vão desde consórcios (ao nível do estágio da pesquisa cooperativa pré-competitiva) até a criação de novas empresas e *joint ventures*.

Tabela 2  
**Ranking de 2010 da revista *Biofuels Digest* das tecnologias mais “transformadoras” em biorrefinarias**

Tipo de tecnologia transformativa	Principais inovadores
Plataformas de microalgas, cianobactérias, “lemna” e plâncton	Algenol – OriginOil – PetroAlgae – Sapphire Energy – Solazyme
Combustíveis microbianos	Amyris – Joule Unlimited – LS9
Química renovável	BioEnergy International
Tecnologias de biobutanol	Butamax – Cobalt Technologies – Gevo – Green Biologics
Tecnologias de matérias-primas avançadas	Ceres
Tecnologias Fischer-Tropsch	ClearFuels – Rentech
Etanol celulósico	Coskata – Dupont Danisco Cellulosic Ethanol – Mascoma – POET – Qteros – Verenium
Marinha – tecnologias de macroalgas	DuPont/BioArchitecture Lab – SES – Seaweed Energy Solutions
Matérias-primas tolerantes a sal	Energy Allied International, The Seawater Foundation and Global Seawater – Masdar Institute of Science and Technology, Boeing, Etihad Airways and UOP Honeywell
Tecnologia de motores	Ford Motor Company – Bobcat project
Tecnologias e plataformas enzimáticas	Genencor – Novozymes
Sistemas de pequena escala e <i>microfuels</i>	KL Energy
Sistemas de biodiesel	SBI Bioenergy

Fonte: *Biofuel Digest*, The 2010 Transformative Technology 30.

Os principais desafios para a competitividade do modelo de biorrefinaria estão relacionados à disponibilidade e aos custos de matérias-primas, às novas técnicas da moderna biotecnologia industrial, a processos termoquímicos aperfeiçoados e a sua aplicação em escala comercial, além da capacidade de unir múltiplas cadeias de valor.

Medidas regulatórias têm tido papel-chave no desenvolvimento de biorrefinarias, por meio de metas governamentais para uso e produção de biocombustíveis. A meta dos Estados Unidos, lançada na administração Bush, projetava originalmente produção de 36 milhões de galões (164 milhões de litros) até 2022, equivalentes a 20% das necessidades de transporte do país, que na gestão de Barack Obama

chega a 21 bilhões de galões até 2022 e 60 bilhões até 2030 (*market share* superior a 30%).<sup>11</sup>

Além da segurança energética e dos aspectos ambientais, questões econômicas têm se tornado cada vez mais uma razão determinante [IEA (2009)], tal como a busca de fontes alternativas de matérias-primas químicas, por causa da escassez de matérias-primas fósseis ou como forma de diversificação de risco em função da alta volatilidade de seus preços. Adicionalmente, a busca por matérias-primas renováveis e inovação em químicos implica imprimir um novo ímpeto ao ritmo estagnante da inovação química desde os anos 1980. Acredita-se, cada vez mais, que biorrefinarias poderão emergir de projetos de biocombustíveis em indústrias nas quais o conceito de biorrefino já está estabelecido, como em papel e celulose ou na química [Chemsystems (2012)].

### **O longo, complexo e incerto caminho rumo às tecnologias comerciais**

Biorrefinarias integradas podem ser classificadas de acordo com distintas tecnologias em que se baseiam:

- Tecnologias de primeira geração: tecnologias maduras para produção de etanol do açúcar e amido. Com exceção da cana, sofrem sérias críticas por competir com a produção de alimentos (diretamente ou na disputa pelo uso da terra), além do real balanço energético e da redução da emissão de gases de efeito estufa.
- Tecnologias de segunda geração: biomassa lignocelulósica convertida em biocombustíveis e químicos por processos bioquímicos (tais como a hidrólise enzimática, que emprega enzimas e microrganismos geneticamente modificados para quebra da celulose e transformação em açúcar, com conversão subsequente em etanol, por fermentação) ou processos termoquímicos (gaseificação da biomassa e posterior liquefação; pirólise).

<sup>11</sup> As metas da União Europeia para energia renovável não são tão ambiciosas com relação aos biocombustíveis: 10% do combustível de transporte terá de vir de fontes renováveis.

- Tecnologias de terceira geração: biocombustíveis avançados e rotas químicas por meio de algas e hidrogênio da biomassa, muitas em estágio de P&D.
- Tecnologias de quarta geração: que combinam matérias-primas geneticamente “otimizadas” (com capacidade de capturar maior quantidade de carbono) e microrganismos geneticamente modificados com vistas a alcançar fonte de carbono neutra para biocombustíveis e bioquímicos.

Apesar desses vários tipos de biorrefinarias, apenas dois grandes grupos dominantes de tecnologias (ou plataformas) parecem estar efetivamente em jogo: a plataforma bioquímica e a plataforma termoquímica. Enquanto muitos dos esforços de P&D na plataforma termoquímica consistem de melhoramentos em tecnologias existentes e muitos desafios estão relacionados à fabricação de equipamentos, a plataforma bioquímica envolve tecnologias estritamente inovadoras e potenciais *breakthroughs*, sustentada pelos passos incertos da moderna biotecnologia industrial em produção em larga escala [Bastos (2007)].

A rota bioquímica para produção de químicos renováveis e biocombustíveis em biorrefinarias baseia-se na moderna biotecnologia, dando lugar a uma “terceira onda da biotecnologia”.<sup>12</sup> A biotecnologia industrial (ou branca, como também é chamada) tem evoluído como um típico setor baseado na ciência, em que as fronteiras convencionais entre ciência e tecnologia parecem ruir e empresas *start-ups* surgem de universidades e laboratórios de P&D [Fonseca e Bastos (2006)]. Por meio da biotecnologia, é possível criar novas moléculas que formam os *building blocks* com propriedades semelhantes aos materiais fósseis.

<sup>12</sup> A biotecnologia industrial é considerada um campo revolucionário da biotecnologia depois do clímax da biotecnologia verde (agrícola) e vermelha (saúde) nos anos 1990, com desenvolvimento de medicamentos com base em DNA recombinante e em anticorpos monoclonais. Com numerosas aplicações, as empresas que trabalham em biotecnologia branca são capazes de produzir biocombustíveis, químicos *bio-based* e biomateriais a partir da biomassa. A síntese biotecnológica tem potencial para complementar ou suplantiar muitas rotas de síntese química para produtos químicos estabelecidos com mais alto custo-eficiência, economia de matéria-prima e benefícios ao meio ambiente [Schneider (2009)].

Tecnologias de biomassa lignocelulósica estão nos últimos estágios de P&D ou demonstração, enfrentando desafios de comercialização e escalonamento. Várias plantas de demonstração – projetadas não como provas de conceito, mas visando demonstrar a viabilidade econômica e a competitividade de custo, rendimento e eficiência – estão em construção no mundo, particularmente nos Estados Unidos, envolvendo parcerias de *start-ups* de biotecnologia, empresas de petróleo e químicas, com forte apoio do governo. As primeiras plantas comerciais devem estar operacionais antes de 2015-2020 [Williamson (2011)].

A rota bioquímica ainda requer melhoramento das características da matéria-prima, redução de custos por meio de adequados processos de pré-tratamento, melhoramentos da eficácia das enzimas, redução dos custos de produção, melhoria completa e integração de processo. A rota termoquímica, um processo mais maduro e há muito tempo em operação em processos de conversão de carvão e gás natural (*coal-to-liquid* e *natural gas-to-liquid*), tem menores oportunidades de redução de custos, segundo especialistas (Tabela 3) [Williamson (2011)].

Tabela 3  
Indicadores de rendimentos de biocombustíveis por tonelada seca de matéria-prima, por meio de rotas de processamento bioquímico e termoquímico

Processos	Rendimento biocombustível (litro/t seca)		Conteúdo de energia (MJ/litro) <i>Low heat value</i>	Rendimento de energia (GJ/t)	
	Baixo	Alto		Baixo	Alto
Bioquímica					
Etanol por hidrólise enzimática	110	300	21,1	2,3	6,3
Termoquímica					
Syngas-to-Fischer-Tropsch diesel	78	200	34,4	2,6	6,9
Syngas-to-Ethanol	120	160	21,1	2,5	3,4

Fonte: Williamson (2011).

Essas tecnologias avançadas em estágio de desenvolvimento ainda envolvem custos não competitivos de produção. Os preços do petróleo dão o *breakeven point* para a viabilidade das biorrefinarias. Preços dos combustíveis são atrelados aos preços do petróleo, que

têm estado altos e voláteis (acima de US\$ 100 o barril), embora os preços dos produtos químicos básicos sejam crescentemente relacionados aos preços do gás natural, que, entretanto, têm mostrado tendência à queda desde meados da década de 2000, em função do desenvolvimento de tecnologia do *shale gas* nos Estados Unidos, e que representa um desafio adicional para a viabilidade econômica das biorrefinarias [Chemsystems (2012)].

O desafio crítico a ser enfrentado para a viabilidade comercial de biocombustíveis e químicos a partir da celulose tem sido apontado como sendo a criação de tecnologias de processo custo-efetivas e eficientes de pré-tratamento da biomassa (ainda não disponíveis), dado que este corresponde ao segundo maior custo na produção de biocombustível (19%-22%), depois do custo da matéria-prima (30%-32%). Adicionalmente, existem desafios logísticos relacionados a altos *up-front costs* da oferta e do transporte de matérias-primas em escala comercial [Williamson (2011)].

**Tabela 4**  
**Hipóteses do IEA de custos de etanol de 2ª geração**  
**em 2010, 2030 e 2050**

Tecnologia de conversão lignocelulósica	Hipóteses	Custos de produção		
		2010 US\$/lge	2030 US\$/lge	2050 US\$/lge
Etanol bioquímico	Otimista	0,80	0,55	0,55
	Pessimista	0,90	0,65	0,60
Etanol termoquímico	Otimista	1,00	0,60	0,55
	Pessimista	1,20	0,70	0,65

Fonte: Williamson (2011).

De todo modo, os custos de produção associados a ambas as rotas tecnológicas são ainda incertos. Projeções da International Energy Agency (IEA) sobre custos futuros, atualmente entre US\$ 80 e US\$ 90/litro de gasolina equivalente (lge) para o etanol, são mostradas na Tabela 4 para a segunda geração de biocombustíveis. Esses custos necessitariam cair até algo em torno de US\$ 0,80/lge para competir com o preço por atacado do petróleo em torno de US\$ 100/bbl. Entretanto, Williamson (2011) considera que as amplas flutuações do preço

do petróleo e do gás tornam os combustíveis de segunda geração aos custos atuais um investimento arriscado.

Embora algumas tecnologias emergentes possam ter chegado ao sucesso técnico, nenhuma ainda alcançou sucesso comercial. Estimativas sobre a capacidade de produção do etanol celulósico nos Estados Unidos e em países da Europa [Nyko *et al.* (2010)] evidenciam resultados modestos quando chegarem ao estágio operacional, tendo em vista que as plantas celulósicas representarão menos de 2% da atual capacidade mundial de etanol convencional.

Entretanto, a despeito das tendências de preços a curto prazo, excepcionais desafios de longo prazo relacionados ao esgotamento do petróleo e questões ambientais continuam em jogo. Ademais, as condições extremas das descobertas de novas reservas fósseis e os consequentes elevados custos de exploração e produção (tais como a exploração em águas ultraprofundas da camada pré-sal do petróleo brasileiro) significam fortes incentivos para a produção de químicos renováveis, biocombustíveis e biorrefinarias. As estimativas da IEA indicam que as necessidades mundiais de energia primária crescerão em mais de 50% até 2030. O rápido crescimento das economias emergentes significará níveis sem precedentes de consumo de combustíveis, energia e produtos químicos que demandarão a contribuição de bioquímicos e biocombustíveis.

## O financiamento das biorrefinarias nos Estados Unidos

O financiamento da inovação em biotecnologia branca (em energia) por *start-ups* americanas requer posturas financeiras mais arriscadas do que a mera intermediação. De fato, o capital de risco foi importante fonte de financiamento do *boom* da energia limpa entre 2005 e 2008, embora tenha experimentado declínio com a crise financeira, da ordem de 40%, entre 2008 e 2009 (Gráfico 3).

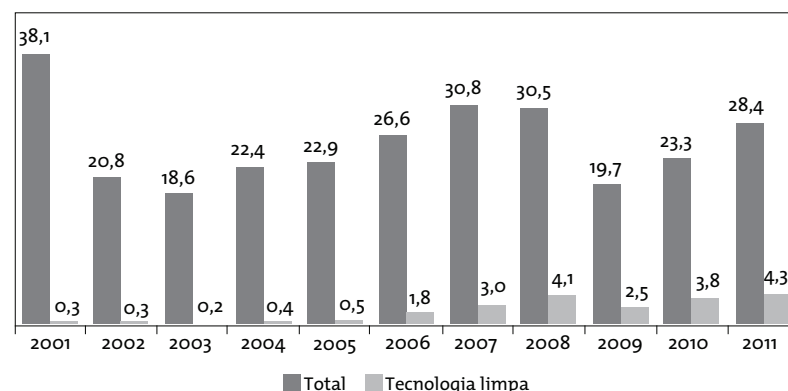
Embora o capital de risco já tenha recuperado os níveis de 2008 no apoio às energias limpas, com investimentos acumulados de US\$ 10,6 bilhões entre 2009 e 2011 e uma média anual de quase o dobro da verificada no período 2002-2008, quando o apoio acu-



mulado foi de US\$ 10,3 bilhões [PWC/NVCA (2011); PWC (2012)], desde a crise ocorreram mudanças qualitativas importantes em sua atuação. O capital de risco parece ter perdido boa parte do apetite por projetos de mais alto risco em biocombustíveis, passando a priorizar aqueles que contemplam a fabricação conjunta de produtos químicos “renováveis” (de algo em torno de 10% do total em 2006-2007 a cerca de três quartos do investimento total em 2010), conforme Gráfico 4. Os dados da Unep (2011) indicam, contudo, que a recuperação do capital de risco e *private equity* em energia renovável em 2010 ainda não retornou aos níveis recordes de 2008 – justamente no momento em que as empresas de biotecnologia industrial aplicada à energia estariam, em sua maioria, no período crítico conhecido como “Vale da Morte”.<sup>13</sup>

Gráfico 3

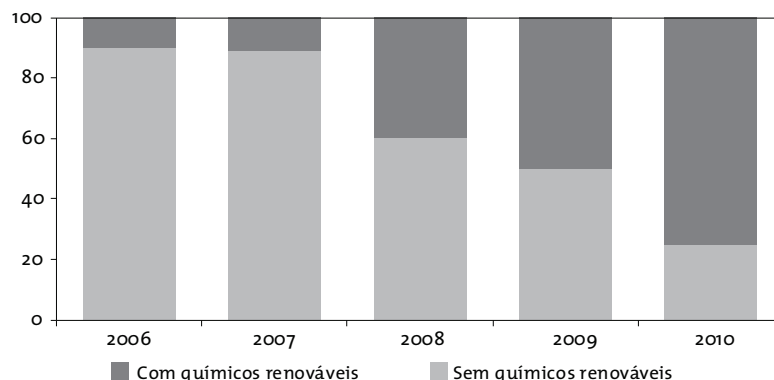
Capital de risco nos EUA – investimento total e em tecnologias limpas – 2001-2011 (US\$ bilhão)



Fonte: PWC/NVCA.

<sup>13</sup> “Vale da Morte” é uma expressão empregada no mercado de capital de risco entendida como o período mais arriscado financeiramente entre o recebimento de aporte de recursos de capital de risco e o início do período em que a empresa vai auferir receitas.

Gráfico 4  
Parcela dos investimentos do capital de risco em empresas de biocombustíveis que contemplam ou não químicos renováveis – 2006-2010 (em %)



Fonte: Cleantech *apud* Chemsystems (2012).

Em especial, o financiamento das biorrefinarias e de tecnologias de biotecnologia industrial em energia, por suas características, tem ensejado muitos questionamentos sobre a adequação do modelo do mercado de capitais. A indústria emergente de biorrefino, cheia de promissoras *start-ups* detentoras de tecnologias para conversão da biomassa em combustíveis e químicos, enfrenta grandes desafios no desenvolvimento de tecnologia desde o laboratório até a escala comercial,<sup>14</sup> especialmente para firmas de biotecnologia emergentes engajadas na inovação e na instalação de biorrefinarias.

Apesar da forte base de conhecimento científico (em bioquímica, biologia, química e outros campos que estão na raiz da moderna biotecnologia) e da pesquisa em laboratório de novas plataformas químicas (como a biologia sintética), as empresas de biotecnologia são inexperientes para enfrentar os desafios e tarefas demandados para lançar um novo produto no mercado e têm capacidade financeira

<sup>14</sup> Historicamente, a indústria química enfrentou grandes desafios de escalonamento e muitas inovações falharam em alcançar sucesso comercial no estágio de escalonamento. Nas tecnologias bioquímicas, esses riscos podem ser ainda maiores.

limitada diante das exigências para construir plantas em escala comercial, pré-comercial ou mesmo demonstração. A engenharia química e outros campos de conhecimento exigidos para transformação de reações em escala de bancada na produção em plena escala industrial não são dominados pelas firmas de biotecnologia e demandam expressivas somas de recursos. Especialmente em áreas novas, como biotecnologia, não há sequer dados suficientes de engenharia para o projeto de plantas comerciais. Além disso, a biotecnologia trabalha com organismos vivos cujas condições de operação podem mudar de acordo com a escala e o ambiente.

Schneider (2009) argumenta que mercados de capitais e capitalistas de risco ainda não aceitam a biotecnologia industrial (ou branca), que é a base de muitas biorrefinarias, por causa das expressivas dificuldades de adequada avaliação das empresas (*valuation*) e das amplas oportunidades de investimento.<sup>15</sup> O mercado potencial da biotecnologia vermelha, aplicada na saúde, seria mais fácil de estimar por estar focado em medicamentos específicos, ao passo que a biotecnologia industrial desenvolve novas rotas de processo para uma série de produtos (como biocombustíveis, bioquímicos e energia), é mais complexa e exige maior conhecimento sobre a indústria.

Estudo de Ghosh e Nanda (2010) questiona a adequação do modelo de capital de risco à biotecnologia industrial em energia. O setor de energia seria uma indústria madura, altamente competitiva em preços e dominada por grandes corporações. Novas rotas de processamento buscam, assim, economias de matéria-prima e maior eficiência refletida em custos. Inovações bem-sucedidas requerem aportes expressivos de capital, durante longos períodos, que podem ser décadas, envolvendo atividades complexas e caras de escalonamento (P,D&D) e exigindo instalação de plantas de demonstração de larga escala.<sup>16</sup> Essas características

<sup>15</sup> Entretanto, seria exigido maior prazo para uma ideia chegar ao mercado – de três a cinco anos, comparado ao período de dez a 12 anos para novos medicamentos, em função de exigências regulatórias, além de risco menor do investimento pela maior diversificação de aplicações/mercados [Schneider (2009)].

<sup>16</sup> Estimativas dos custos de planta-piloto de etanol de segunda geração estão entre

do setor de energia (e mesmo da química básica) seriam contrastantes com aquelas do modelo típico do capital de risco, que exige rápido e elevado retorno do investimento e horizonte de tempo para saída, apoiando *start-ups* que usualmente requerem menos capital e dificilmente exigem prazos longos para terem êxito ou fracasso (como *software*).

A crise, nesse sentido, significou o amplo reconhecimento de que comercializar aquelas tecnologias é arriscado e complexo para firmas de biotecnologia, o que pode explicar a mudança (ou ampliação) do foco de muitas dessas firmas *biotechs* em direção a produtos químicos (de maior valor e margens de lucro). Além de forte apoio governamental, principalmente pelo caráter de bem quase público dessas inovações, Ghosh e Nanda (2010) recomendam alianças e parcerias com grandes e experientes *players* em projetos colaborativos de P,D&D.

De todo modo, a crise evidenciou o papel fundamental dos governos no financiamento às biorrefinarias, principalmente porque mesmo antes existiam poucas opções de *funding* para construção de grandes plantas em escala comercial ou demonstração [Biorefining Magazine (2011a)]. Com a crise, capitalistas de risco recuaram de empresas novas e concentraram-se em entidades bem estabelecidas [Chu (2011)]. No caso americano, houve fortalecimento de sua rede de instrumentos (regras de uso mandatório, incentivos fiscais, subvenções a P,D&D, garantias de empréstimos, programas de encomendas públicas, programas de aquisição certificada e rotulagem voluntária etc.). Jenkins *et al.* (2012) estimaram aumento maciço do suporte federal nos Estados Unidos às tecnologias limpas com a crise, que passou de US\$ 44 bilhões, em 2002-2008 – em relação a menos de um quarto desse valor por parte do capital de risco –, para US\$ 150 bilhões, em 2009-2014, e o potencial de alavancar o investimento agregado público e privado acumulado a algo entre US\$ 327 e US\$ 622 bilhões.

O expressivo aumento no volume de recursos decorreu do lançamento do American Recovery and Reinvestment Act (ARRA) como parte do pacote de US\$ 800 bilhões de estímulo econômico para P,D&D em biorrefinarias e biocombustíveis avançados. A política

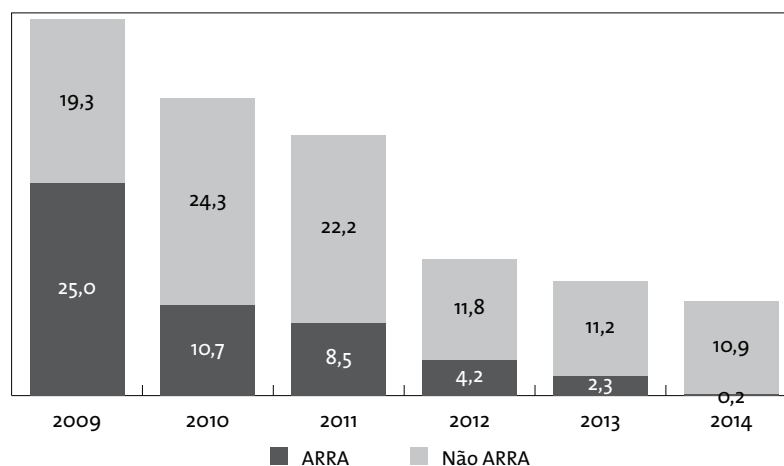
---

US\$ 200 milhões e US\$ 300 milhões, enquanto as plantas de demonstração podem chegar a US\$ 500 milhões.

americana para biorrefinarias teve início em 2000, deslanchando a partir de 2005, mas o ARRA significou a confirmação de seu *turning point* no sentido de conferir maior prioridade ao foco prático e à inovação comercial (em relação ao apoio à pesquisa básica, que recebeu apenas 14% dos recursos totais do pacote)<sup>17</sup> e inclusão de bioquímicos como elegíveis para apoio do DOE, decisivo para o escalonamento e o sucesso comercial das biorrefinarias [Biorefining Magazine (2011c)].

Gráfico 5

Dispêndio federal com energia limpa nos EUA – 2009-2014 (US\$ bilhões)



Fonte: Jenkins *et al.* (2012).

Desde então, os recursos sofreram drástica redução, pelo caráter temporário dos programas do ARRA, cuja maioria se extingue em 2012 (Gráfico 5). A queda dos recursos federais reflete a mudança na prioridade da política americana para o desenvolvimento do gás natural (do *shale rock*), conforme discurso do presidente Barack Obama no

<sup>17</sup> Todos os países da OCDE e muitos não OCDE introduziram medidas discricionárias por meio do lançamento de pacotes de estímulo econômico frente à crise. Os pacotes fiscais dos países da OCDE somaram cerca de 3,5% do PIB da área, com destaque para os Estados Unidos, cujo pacote somou 5,5% do PIB de 2008. Entre os emergentes, o pacote chinês somou 19% do PIB, segundo OCDE (2009). As áreas prioritárias foram infraestrutura, P&D e tecnologia verde.

State of the Union de 2012. A maioria dos recursos concentrou-se em operacionalização/mercados (73% do total acumulado de US\$ 150 bilhões), P,D&D (19%) e manufatura (8%); quase 60% dos recursos na forma de dispêndio direto, 34% em incentivos fiscais e 7% em garantias capazes de alavancar quase US\$ 50 bilhões em empréstimos.

De todo modo, a importância dos recursos federais é evidente, acumulando US\$ 108 bilhões em 2009-2011, paralelamente a investimentos de capital de risco de meros 10% desses valores. O enorme *gap* entre fontes do governo americano e do capital de risco pode ser atribuído ao elevado montante de plantas de demonstração e pré-comercial das biorrefinarias, muito além do que o capital de risco poderia suportar. No caso específico dos biocombustíveis, o apoio federal americano teria somado US\$ 2,1 bilhões, entre 2000 e 2009 [Nyko *et al.* (2010)].

Embora os instrumentos mais conhecidos de encorajamento dos biocombustíveis sejam regras e metas de uso mandatório, subvenções e incentivos tributários, uma rede mais ampla foi desenvolvida pelo governo americano para apoio às biorrefinarias.<sup>18</sup> Tal rede inclui programas de três departamentos federais (Energia, Agricultura e Defesa) e baseia-se em uma abordagem da inovação de natureza sistêmica e orientada para o mercado (*demand-oriented innovation policy*),<sup>19</sup> a partir de instrumentos de suporte às atividades mais próximas do mercado destinadas a demonstrar a viabilidade das tecnologias emergentes, o escalonamento de processos e o caráter “comercializável” da inovação. O apoio a unidades de demonstração e pré-comerciais, tais como *grants*, garantias de empréstimos (*loan guarantees*), programas de compras públicas, programas de certificação e etiquetagem, tem beneficiado diretamente pequenas firmas *start-ups* de biotecnologia, grandes *players* das indústrias de

<sup>18</sup> A principal fonte de apoio federal a P&D é o DOE, responsável por quase três quartos dos fundos federais para P&D em energia (com destaque para a ARPA). O restante dos recursos provém de outras agências federais, em especial a National Science Foundation (NSF), o Departamento de Defesa e o USDA. O apoio à produção é originado de poucos programas federais (*grants* temporários e incentivos fiscais iniciados com o Recovery Act; e programas de empréstimos e garantia de empréstimos) [Jenkins *et al.* (2012)].

<sup>19</sup> A respeito das políticas de inovação orientadas para a demanda ou medidas pelo lado da oferta, ver Edler e Georgiou (2007).

petróleo, química e agronegócios. A Tabela 5 sumariza alguns dos investimentos em biorrefinarias nos Estados Unidos apoiados pelo DOE, por meio do Biomass Program.<sup>20</sup>

Um mecanismo importante de apoio às biorrefinarias do DOE são os programas de empréstimos e garantia de empréstimos, cujas metas primárias são demonstrar tecnologias e reduzir a percepção de risco para investidores privados, alavancando investimentos por meio de reembolso pelo governo do empréstador por perdas eventuais, até uma percentagem determinada. Um desses programas foi criado em 2005 e executado como custo neutro para o governo (“autofinanciável” por exigir das empresas o reembolso do subsídio de crédito associado com a garantia do empréstimo), ao passo que um segundo programa, lançado como parte do ARRA 2009 em meio às dificuldades para garantir financiamentos em um mercado de crédito apertado, não exige dos tomadores o pagamento dos custos do subsídio de crédito.<sup>21</sup>

O Departamento de Agricultura (USDA) tem também importantes programas e instrumentos, incluindo garantias de empréstimos às primeiras biorrefinarias comerciais. O governo garante até 80% do empréstimo – o que significa que cobrirá essa parte do empréstimo no caso de fracasso do projeto e *defaults* do pagamento pela empresa – de bancos comerciais, possibilitando menores taxas de juros. A falta de efetividade do programa, pela crise e pela aversão de risco dos bancos comerciais, levou a mudanças, com a introdução de um mecanismo do mercado de títulos, de modo a atrair investidores institucionais (fundos mútuos, companhias de seguro ou fundos de pensão), mais apropriados do que bancos para investimentos de longo prazo de alto risco de tecnologias não provadas.

<sup>20</sup> O Biomass Program/ERRE (Energy Efficiency and Renewable Energy) compreende vários programas federais, entre os quais o Biomass & Biorefinery Program. A Advanced Research Projects Agency-Energy (ARPA-E), outra agência importante do DOE, é voltada exclusivamente para inovações de alto impacto, apoiando P,D&D e atividades operacionais em tecnologias de energia limpa.

<sup>21</sup> O mecanismo vem passando, contudo, por séria reavaliação em função das perdas de casos como a falência da Solyndra, empresa fabricante de painéis de energia solar.

**Tabela 5**  
**Investimentos em biorrefinarias nos EUA apoiados pelo USDOE (Biomass Program)**

Empresa	Tecnologia de conversão	Matéria-prima	Produto primário	Capacidade biocombustível (gal/ano)	Escala	Localização
Solazyme Inc.	Algas	Algas	Lipídios de algas	300.000	Piloto	Riverside, Pennsylvania
Sapphire Energy Inc.	Algas	Algas	Lipídios de algas	1.000.000	Demonstração	Columbus, New Mexico
Algenol Biofuels Inc.	Algas	Algas	Etanol	100.000	Piloto	Fort Meyers, Flórida
Lignol	Bioquímica	Recursos florestais	Etanol	2.500.000	Demonstração	Femdale, Washington
Pacific Bioasol	Bioquímica	Plantas energéticas, resíduos agrícolas	Etanol	2.700.000	Demonstração	Boardman, Oregon
Amyris	Bioquímica	Plantas energéticas	Diesel renovável	1.370	Piloto	Emeryville, Califórnia
Biotechnologies Inc.	Bioquímica	Plantas energéticas, recursos florestais, resíduos agrícolas	Etanol	50.000	Piloto	Visalia, Califórnia
Logos Technologies	Bioquímica	Plantas energéticas, recursos florestais, resíduos agrícolas	Etanol	15.000.000	Comercial	Kugoton, Kansas
Abengoa	Bioquímica	Plantas energéticas, recursos florestais, resíduos agrícolas	Etanol	25.000.000	Comercial	Emmetsburg, Iowa
POET	Bioquímica	Resíduos agrícolas	Etanol	345.000	Piloto	St. Joseph, Missouri
ICM Inc.	Bioquímica	Plantas energéticas	Etanol	40.000.000	Comercial	Kinross, Michigan
Mascoma	Bioquímica	Recursos florestais	Etanol	894.000	Piloto	Alpena, Michigan
American Process Inc. (APL)	Bioquímica	Recursos florestais	Etanol	25.800	Piloto	Decatur, Illinois
Archer Daniels Midland (ADM)	Bioquímica	Resíduos agrícolas	Etanol	19.000.000	Comercial	Fulton, Mississippi
Bluefire LLC	Bioquímica	Recursos florestais, MSW	Etanol	0	Demonstração	Lake Providence, Louisiana
Myriant	Bioquímica	Plantas energéticas	Bioprodutos	1.400.000	Demonstração	Jennings, Louisiana
Verenium	Bioquímica	Plantas energéticas, resíduos agrícolas	Etanol	1.500.000	Demonstração	Old Town, Maine
RSA	Bioquímica	Recursos florestais	Biobutanol			

Continua



Continuação						
Empresa	Tecnologia de conversão	Matéria-prima	Produto primário	Capacidade biocombustível (gal/ano)	Escala	Localização
Elevance Renewable Sciences	Química	Algas	Diesel renovável, combustível de aviação	n.a.	P&D	Bolingbrook, Illinois
ZeaChem Inc.	Híbrida	Plantas energéticas, resíduos agrícolas	Etanol	250.000	Piloto	Boardman, Oregon
Ineos New Planet Bioenergy LLC	Híbrida	MSW	Etanol	8.000.000	Demonstração	Vero Beach, Flórida
ClearFuels Technology	Termoquímica-gaseificação	Recursos florestais, resíduos agrícolas	Diesel renovável, combustível de aviação	151.000	Piloto	Commerce City, Colorado
Flambeau	Termoquímica-gaseificação	Recursos florestais	Diesel renovável, ft waxes	9.000.000	Comercial	Park Falls, Wisconsin
NewPage	Termoquímica-gaseificação	Recursos florestais	Renewable ft liquids	8.200.000	Demonstração	Wisconsin Rapids, Wisconsin
Haldor Topsoe Inc.	Termoquímica-gaseificação	Recursos florestais	Hidrocarbonetos renováveis	345.000	Piloto	Des Plaines, Illinois
Renewable Energy Institute International (REII)	Termoquímica-gaseificação	Algas, plantas energéticas, recursos florestais, resíduos agrícolas	Diesel renovável	625.000	Piloto	Toledo, Ohio
Enerkem	Termoquímica-gaseificação	Recursos florestais, MSW	Etanol	10.000.000	Demonstração	Pontotoc, Mississippi
RangerFuels	Termoquímica-gaseificação	Recursos florestais	Etanol, metanol	20.000.000	Comercial	Soperton, Georgia
UOP LLC	Termoquímica-pirólise	Algas, plantas energéticas, recursos florestais, resíduos agrícolas	Diesel, gasolina renovável	60.000	Piloto	Kapolei, Hawai
Gas Technology Institute (GTI)	Termoquímica-pirólise	Algas, recursos florestais, resíduos agrícolas	Diesel, gasolina renovável	n.a.	P&D	Des Plaines, Illinois

Fonte: US Department of Energy.

Importante programa do USDA destinado a levar as inovações ao mercado é o Biopreferred Program, que possui dois componentes: (a) Federal Acquisition Regulator (FAR) para aquisição sustentável por agências federais de produtos *bio-based* (nas compras federais, exige-se um conteúdo mínimo renovável, especificado e certificado pelo USDA), existindo intenção de sua expansão de modo a incluir também as compras de produtos intermediários e matérias-primas; e (b) Certified Biobased Product, que corresponde à rotulagem voluntária para produtos certificados pelo USDA, assim assumindo maior visibilidade no mercado.

O desenvolvimento de biorrefinarias também tem apoio das compras militares dos Estados Unidos por meio da ação do Departamento de Defesa (USDOD) em sincronia com os instrumentos de política do DOE e do USDA, criando mercado e demonstração para investidores e usuários potenciais, de combustíveis da marinha e da aviação. A aviação tem um papel especialmente grande na indústria de biocombustíveis, uma vez que não existem perspectivas de outros substitutos aos combustíveis fósseis (como ocorre com os veículos terrestres) e são auspiciosas as projeções de aumento do tráfego aéreo [Nature (2011)]. O USDOD fixou meta agressiva de uso de 50% de biocombustíveis até 2016.

O aspecto que mais sobressai não recai no montante de recursos federais, mas no papel do governo em prover recursos para um caso típico de dupla externalidade. Embora alianças estratégicas e parcerias (mesmo internacionais) comecem a se tornar fontes importantes de *funding*, o apoio federal às biorrefinarias continuará a ser fundamental para sua viabilização.

## **Oportunidades e desafios em biorrefinarias no Brasil**

### **O etanol combustível no Brasil**

O Brasil enfrentou uma jornada exitosa em etanol combustível convencional (ou de primeira geração). De meados da década de 1970 ao início dos anos 1990, uma intervenção federal agressiva no mercado

e forte suporte financeiro, sob a égide do Programa Nacional do Álcool (Proálcool), permitiram desenvolver uma vigorosa indústria de biocombustível com base na cana-de-açúcar.

O programa foi desenhado, quando as importações de petróleo estavam próximas de 80% do consumo doméstico, para encorajar o etanol combustível por meio de: regras regulatórias (mistura mandatória do etanol anidro à gasolina e, depois da segunda crise do petróleo, o desenvolvimento de motor especial de veículos movido exclusivamente a etanol hidratado); incentivos fiscais; empréstimos subsidiados; e preços de combustíveis controlados por meio de um esquema de subsídio cruzado (*cross-subsidy scheme*) em que os preços da gasolina eram artificialmente fomentados para manter o preço do etanol em nível competitivo [Xavier (2007)]. Importante também foi a rede de infraestrutura logística de armazenamento e distribuição pela Petrobras.

A partir da segunda metade da década de 1980, a mudança nas condições econômicas (alta inflação, altos déficits fiscais, queda nos preços do petróleo e reorientação da cana para produção de açúcar, em função da alta dos preços do produto no mercado internacional, levando à oferta insuficiente e à importação de etanol) comprometeu a continuidade do programa, até sua extinção no início da década de 1990, com o mercado de etanol desregulado e liberalizado.

A indústria de etanol enfrentou grandes dificuldades até a onda de expansão seguinte, permitida com o desenvolvimento de tecnologia de motores e lançamento de veículos bicomcombustíveis (*flex-fuel*) em 2003, além do aumento da mistura obrigatória do etanol à gasolina (na faixa de 20% a 25%, dependendo do mercado de etanol). A partir daí, teve início uma expansão significativa liderada pelo mercado doméstico (cerca de 80% da produção de etanol, embora com exportações crescentes).

A produção brasileira de etanol é feita por cerca de 430 destilarias, em algo em torno de 26 bilhões de litros (6,86 bilhões de galões) no ano passado. O Brasil é o maior mercado mundial de biocombustíveis, que representa mais de 40% do consumo doméstico de combustíveis – enquanto nos Estados Unidos o etanol

do milho alcança cerca de 3% da demanda de combustíveis para transporte terrestre. Na safra de 2010-2011, 620 milhões de toneladas de cana-de-açúcar foram produzidas (empregando 2% de terra agrícola) para produção de etanol (um pouco menos do que a metade) e açúcar. Essa produção gera resíduos agrícolas (bagaço e palha) na proporção de cerca de dois terços da produção total de cana-de-açúcar, usados na geração de energia (usinas e destilarias são autossuficientes em oferta de energia, que pode ainda ser vendida em leilões) ou queimados no campo, mas constituem matéria-prima potencial para etanol lignocelulósico.

As vantagens competitivas do etanol brasileiro resultam da localização geográfica e de condições ideais de solo, clima e temperatura, mas também de uma produtividade agrícola crescente, possibilitada por melhoramentos genéticos da cana-de-açúcar decorrentes da *expertise* do país em tecnologia agrícola e genética, e melhoria da eficiência na síntese industrial do etanol [Silva (2007); Goldemberg (2008)].

Nesse sentido, o sucesso do etanol da cana não pode ser entendido apenas como decorrente das vantagens naturais, mas como resultado de esforços cumulativos, trajetória de aprendizado, inovação incremental e sua difusão ao longo da cadeia de valor do etanol, fabricantes de equipamentos e universidades e institutos de pesquisa [Furtado, Scandiffio e Cortez (2008; 2012)]. Infraestrutura madura, base industrial e um sistema setorial de inovação proporcionaram grandes aumentos de produtividade e redução de custos.

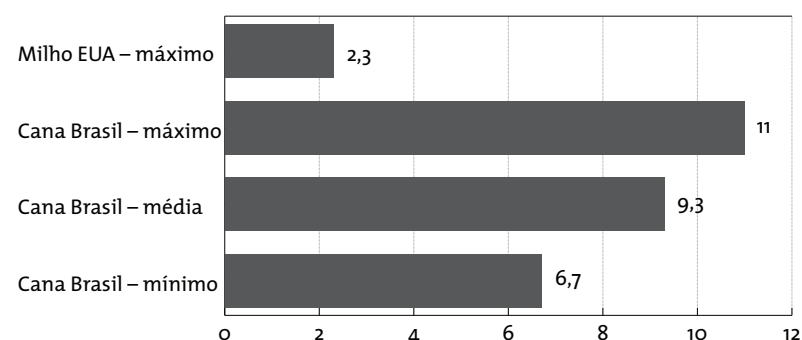
Atualmente, a produção de etanol da cana-de-açúcar envolve uma tecnologia madura e mais eficiente do que em qualquer outro país, com os mais baixos custos de produção<sup>22</sup> [Xavier (2007)]. A cana-de-açúcar é o mais competitivo *feedstock* para produção de etanol, com rendimentos mais altos, custos mais baixos e positivos balanços energéticos e ambientais. Mais de quinhentas variedades comerciais da cana-de-açúcar (vinte variedades são usadas em

<sup>22</sup> A indústria não esteve imune à crise: depois de anos com taxa de crescimento superior a 10% a.a., a produção de cana caiu a 550 milhões de toneladas em 2011, exigindo pacote federal de R\$ 4 bilhões (Programa Prorenova), em 2011, para ampliar a produção de cana-de-açúcar a 1 milhão de hectares de plantação nova ou substituta (Unica).

80% da área de cana) foram desenvolvidas por meio de técnicas tradicionais de melhoramentos genéticos, adaptados a diferentes condições de solo e clima, geneticamente resistentes às principais pragas agrícolas, encurtamento do ciclo de produção, tolerância à escassez de água (possibilitando a produção em terras alternativas) e rendimentos crescentes (níveis mais altos de sucrose). Novos sistemas de moagem foram desenvolvidos, e a fermentação foi adaptada ao uso de diferentes microrganismos (leveduras) e enzimas para produzir mais etanol de forma mais rápida. Como a matéria-prima responde por cerca de 60% dos custos de produção, esses melhoramentos contribuíram para a alta produtividade do etanol. Além disso, existem vantagens ambientais proporcionadas por notável eficiência energética expressa pela razão de barril de petróleo equivalente (Gráfico 6).

Gráfico 6

**Eficiência energética – BOE produto/BOE insumo**

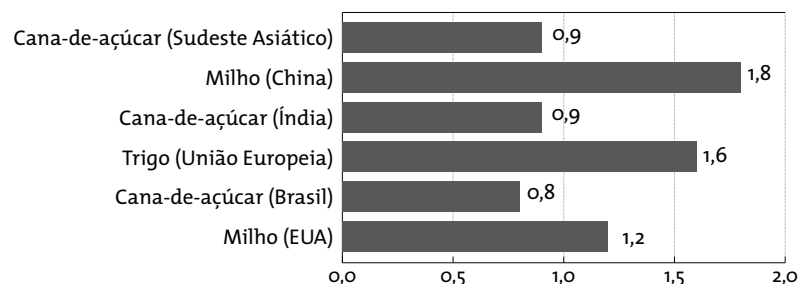


Fonte: USDA *apud* Villela Filho (2011).

Nota: BOE = barrel of oil equivalent.

Alguns estudos reconhecem que as atuais vantagens de custo do etanol da cana (Gráfico 7) seriam mantidas mesmo com o desenvolvimento do etanol celulósico (Gráfico 8) [Meiser (2007)], que, ademais, não terá desafios logísticos para lidar com os resíduos (palha e bagaço) usados na produção de etanol.

Gráfico 7  
Custos do etanol a partir das plantas atuais



Fonte: Meiser (2007).

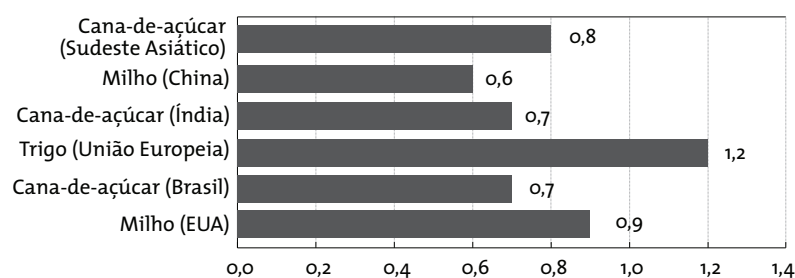
A construção de competências e inovações incrementais na indústria resultou da atuação de diversas instituições públicas de ensino e pesquisa, tais como o Instituto Agrônomo de Campinas (IAC), a Faculdade de Agricultura da Universidade de São Paulo (ESALQ) e a Unicamp, além de instituições privadas de pesquisas, como o Centro de Tecnologia Canavieira (CTC), com fabricantes de equipamentos (como Dedini) e até mesmo *start-ups* locais em biotecnologia, como Alellyx (*spinoff* da USP) e CanaViallis (*spinoff* da Universidade de São Carlos). Essas instituições tiveram papel crítico na competitividade do etanol brasileiro. O sistema setorial de inovação da cana-de-açúcar/etanol, originalmente público e fortemente enraizado no arcabouço de pesquisa do extinto Instituto do Açúcar e do Alcool (IAA), assumiu contorno mais privado depois das reformas econômicas do começo da década de 1990, encontrando caminho próprio de desenvolvimento em função do renovado interesse do setor privado na pesquisa e na inovação em etanol, com vistas ao aumento da produtividade e da lucratividade das usinas e destilarias [Furtado, Scandiffio e Cortez (2008; 2012)].

Atualmente, há um interesse crescente em investimentos em P&D com vistas a melhorar a eficiência da tecnologia de conversão e subprodutos, bem como em tecnologias de segunda geração. Iniciativa notável é também a Rede de Pesquisa em Bioetanol, composta de 22 instituições de pesquisa de diferentes regiões do país, que tam-

bém compreende rede de serviços de tecnologia correlatos, além da pesquisa cooperativa. Pesquisas cooperativas têm sido empreendidas pelo centro de pesquisas da Petrobras (Cenpes) com a Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), a Universidade de Brasília (UNB), a Universidade Federal do Amazonas (UFA) e o CTC. A Ridesa, rede de pesquisas envolvendo 11 universidades, concentra-se em variedades da cana-de-açúcar e no processo de pré-tratamento da biomassa e de enzimas para o processo de hidrólise. A Embrapa, empresa de pesquisa vinculada ao Ministério da Agricultura, também trabalha em variedades de cana e eficiência agrícola, em parceria com firmas domésticas e estrangeiras. O recém-criado Centro de Pesquisa em Bioetanol (CTBE), do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, voltado para inovação em etanol lignocelulósico pela rota bioquímica, está construindo uma planta-piloto para estudos comerciais.

Gráfico 8

**Custos do etanol celulósico a partir de diferentes resíduos**



Fonte: Meiser (2007).

Além disso, há iniciativas em âmbito estadual, como a construção de planta de demonstração da rota termoquímica do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) do estado de São Paulo e da rede de pesquisa colaborativa estruturada pela Fapesp/BIOEN e Dedini, além de parcerias da fundação estadual com empresas nacionais e estrangeiras (Oxiteno, Braskem, BP, Novozymes, além de instituições de pesquisa estrangeiras, como o Fraunhofer, e consórcios como o holandês BE-BASIC). A Tabela 6 sumariza as principais linhas de inovação do país e instituições envolvidas em etanol lignocelulósico.

Embora a indústria brasileira de etanol tenha começado exclusivamente com firmas locais, desde 2006/2007 passou a receber investimentos de empresas estrangeiras de agronegócios e energia (Bunge, Cargill, Infinity Bioenergy, Abengoa, Louis Dreyfous, entre outras), tipicamente por meio de fusões e aquisições (e não *greenfield*). Mais recentemente, vieram as grandes empresas de petróleo, com a Shell formando com a Cosan, uma das grandes nacionais, a *joint venture* Raízen, e a BP adquirindo participações, como na Tropical Bioenergy. Paralelamente, F&A por parte de empresas nacionais entrantes provenientes de outros setores, como a ETH, *joint venture* da Odebrecht e Brenco. Por fim, investimentos conjuntos também ocorrem na construção de infraestrutura de etanoldutos e armazenagem, com vistas à exportação.

Tabela 6  
P&D em etanol lignocelulósico no Brasil

Instituições	Pré-tratamento	Hidrólise		Fermentação do C5	Planta-piloto		
		Enzimática	Ácida		Hidrólise enzimática	Hidrólise ácida	Gaseificação
CTC	X	X			X		
Dedini	X		X			X	
Novozymes		X					
CTBE	X	X		X	X		
Petrobras	X	X		X	X		
Fapesp-BIOEN	X	X	X				
Rede Hidrólise	X	X		X	X		
IPT							X

Fonte: Nyko *et al.* (2010).

Quanto à estrutura industrial, o setor caracteriza-se por quatro novas tendências a partir de meados da década passada: um processo de concentração industrial, em que os 10 maiores grupos respondem por 43% da produção na safra de 2011/2012, em comparação com 30% na safra 2005/2006 [ItauBBA (2011)]; o ingresso de firmas estrangeiras em uma indústria que começou inteiramente local; investimentos estrangeiros em P,D&D em biocombustíveis de próxima geração e químicos, por parte de empresas líderes, de instituições de pesquisa, de consórcios e até de firmas de biotecnologia americanas, em um processo de internacionalização inédito da inovação e indício



de uma nova geografia da inovação, por meio de alianças e parcerias com grupos locais; finalmente, uma participação direta da Petrobras no setor, tanto em produção quanto em P,D&D e inovação, por meio do Cenpes e da constituição da Petrobras Biocombustíveis (PBio).

### Oportunidades em *bio-based* químicos

Embora o Brasil tenha trilhado uma longa e exitosa jornada em etanol combustível, a química baseada no etanol (ou alcoolquímica) não foi tão bem-sucedida no país, com resultados bastante assimétricos [Bastos (2007)].

O Proálcool contemplou, originalmente, o encorajamento da produção de produtos químicos a partir do etanol, por meio de dois tipos de incentivos: (1) subsídio de preço foi concedido ao etanol empregado como matéria-prima química, fixado em 35% do preço do eteno petroquímico e cotas para a matéria-prima subsidiada estabelecidas pelo Conselho Nacional do Petróleo (CNP); e (2) redução a zero da taxa cobrada pelo IAA incidente sobre o preço do etanol (que podia alcançar até 12% do preço do produto) para produtos químicos fabricados com etanol destinados à exportação [Wongstchowski (2002)].

Esses incentivos foram, entretanto, logo extintos, em função da concorrência da instalação concomitante da indústria petroquímica no país. Em 1982, o preço do etanol como matéria-prima química foi equiparado ao preço da nafta petroquímica para todos os produtos químicos que pudessem ser fabricados com base nessa matéria-prima petroquímica, enquanto a isenção da taxa do IAA foi extinta em 1984. Desde então, as plantas de etanol foram sendo progressivamente fechadas, nas décadas de 1980 e 1990, convertidas em plantas com base no eteno.

A indústria química brasileira ocupa atualmente a sétima posição mundial em faturamento (US\$ 158,5 bilhões, em 2011), contribuindo com 2,5% do PIB e 10% do PIB da indústria de transformação. A produção doméstica compreende, entretanto, um conjunto reduzido

de produtos, basicamente *commodities* (principalmente resinas termoplásticas), com crescente dependência de importações, sobretudo de produtos de maior valor agregado e intensidade tecnológica. O déficit na balança comercial tem sido expressivo (US\$ 26 bilhões, em 2011), resultado de elevados coeficientes de importação (em média, 30%), principalmente em intermediários para fertilizantes e químicos orgânicos básicos [Bastos e Costa (2010)]. Estimativas da Associação Brasileira da Indústria Química (Abiquim) projetam um déficit de US\$ 42 bilhões em 2020.

Esse elevado e crescente déficit comercial é explicado pelo reduzido número de produtores domésticos e pela estratégia de fechamento/deslocamento de plantas por empresas multinacionais, além das dificuldades decorrentes da insuficiente oferta doméstica e competitividade de matéria-prima petroquímica (nafta), em que 30% a 40% do consumo doméstico é suprido por importações. A despeito da autossuficiência do país em petróleo, a insuficiência crônica de oferta de nafta deve-se à característica pesada do petróleo brasileiro e à disputa das frações leves com a produção de gasolina [Bastos (2009)].

A crescente demanda por produtos químicos e a insuficiente oferta de químicos produzidos da nafta, juntamente com as vantagens competitivas da cana-de-açúcar, abrem, contudo, uma avenida de oportunidades para o desenvolvimento da química renovável (ou “verde”) no país. Firms químicas domésticas já despertaram para a química baseada no etanol da cana como caminho para a expansão de capacidade produtiva, enquanto a indústria química global começa a buscar diversificar fontes de matérias-primas menos sujeitas à volatilidade de preços. Atualmente, apenas 4% da produção de etanol no país é destinada à indústria química (usada em solventes, farmacêutica e alimentícia), participação que é estimada alcançar 8,8% em 2015, principalmente pela expansão dos biopolímeros [Maxiquim (2010)].

Esse crescente interesse em matérias-primas renováveis na indústria química brasileira reflete-se em investimentos de empresas locais e multinacionais visando à produção química baseada no etanol, como a planta já operacional e outra em implantação de polietileno verde, além do polipropileno verde, da Braskem, o polietileno verde da Dow

e projetos de planta de PVC com base no etanol convencional da Solvay.<sup>23</sup> Essas iniciativas compreendem, contudo, típicos processos químicos, não da biotecnologia industrial moderna.

No entanto, *players* estrangeiros, incluindo instituições acadêmicas, empresas líderes químicas e do petróleo e, recentemente, algumas firmas americanas de biotecnologia começam a despertar para as vantagens comparativas do etanol da cana e parecem ansiosos por alianças com parceiros locais em produção e pesquisa cooperativa – muitas vezes com vistas a empreender os estágios finais do desenvolvimento e demonstração de químicos verdes e biocombustíveis, empregando matéria-prima derivada da cana, seja o etanol ou o açúcar diretamente.

Firmas como Amyris, LS9, Solazyme e outros veículos promissores de *breakthroughs* começam a investir em plantas de demonstração e pré-comerciais no Brasil, em parceria com grupos estabelecidos de maior porte, nacionais ou estrangeiras, do setor de etanol, da química e do petróleo, até mesmo com “novos entrantes”, como a GraalBio, em parceria com M&G, Chemtex, Beta Renewables e outras para implantação de unidade de etanol lignocelulósico no país. A ampla rede de pesquisa e inovação que se forma compreende uma dimensão internacional ainda mais ampla, abrangendo produtores de enzimas, como Novozymes, parcerias com consórcios como o holandês BE-Basic, além de instituições como o alemão Fraunhofer Institute, entre outras.

O amplo interesse desses parceiros estrangeiros parece evidenciar uma dimensão nova do que tem sido apontado como uma crescente internacionalização de atividades de P&D e a emergência de redes de P&D distribuídas globalmente por empresas estrangeiras, dando lugar ao que alguns autores vêm chamando de uma nova geografia da inovação [Bruche (2009)] em função da crescente reorientação do investimento de empresas multinacionais para economias emergentes (notadamente China e Índia). Em particular, abrange o que parece uma dimensão inédita da internacionalização da P&D que passa a incluir *start-ups* de biotecnologia estrangeiras – e não apenas multinacionais [Bastos (2012b)].

<sup>23</sup> Apesar desse interesse, esses projetos foram adiados, logo depois da crise de 2008-2009 ou recentemente.

Embora os países em desenvolvimento, com raras exceções, tenham ficado relativamente afastados da inovação e da produção das duas primeiras ondas da biotecnologia, que estiveram restritas aos países desenvolvidos, um enfoque distinto parece caracterizar a terceira onda, seja pelas vantagens de recursos naturais (*feedstock advantages*), seja pelo papel dos mercados emergentes, seja ainda pela construção de capacitações e competências. No contexto de uma nova geografia da inovação, pode ser possível para as economias emergentes alcançar uma participação inédita no desenvolvimento de tecnologias limpas, além da possibilidade de agregação de valor por meio de investimentos em químicos renováveis.

### **O *funding* das biorrefinarias brasileiras**

A maioria dos investimentos em P&D em biorrefinarias no país tem recebido apoio federal na forma de empréstimos e subvenções, notadamente do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), cujo *funding* busca maior foco para o mercado (*demand-side measures*), mas ainda carrega a tradição do país de forte viés de instrumentos orientados pelas políticas de oferta (*supply-side measures*), na forma de apoio às mencionadas redes e centros de pesquisa e inovação (CTC, Embrapa, CTBE, IPT), em pesquisa pré-competitiva, cabendo mencionar, entretanto, o caso do Cenpes/Petrobras. Em relação ao maior foco no mercado, além do apoio ao desenvolvimento e ao uso de biocombustíveis de aviação e pesquisa em química renovável, vêm sendo incentivadas pesquisas colaborativas entre empresas e universidades/instituições de pesquisa, por meio do apoio da Finep com recursos dos fundos setoriais/FNDCT, em áreas prioritárias da política industrial, como é o caso dos biocombustíveis. Esse apoio total do MCTI, contudo, tem oscilado entre US\$ 12,4 milhões e US\$ 13,2 milhões, anualmente.

O BNDES também apoia essas iniciativas (por meio de recursos não reembolsáveis, empréstimos e participação acionária direta ou por meio de fundos de capital de risco). Mas o montante agregado,

com o Finep, teria alcançado pouco mais de US\$ 200 milhões nos últimos anos – sem considerar os recursos do plano de investimentos da Petrobras de US\$ 300 milhões em P&D em biocombustíveis (etanol e biodiesel). No entanto, o apoio das agências federais vem sendo destinado majoritariamente a universidades e instituições de pesquisa públicas ou sem fins lucrativos, ainda que em projetos cooperativos com empresas. Investimentos em P,D&D das empresas na construção de plantas-piloto, demonstração ou pré-comercial vêm sendo apoiados por meio de empréstimos (ainda que subsidiados) ou participação acionária.

No nível estadual, a importante atuação da Fapesp está mais dirigida ao financiamento à pesquisa pré-competitiva, em virtude de restrições estatutárias, embora venha buscando desenvolver mecanismos que permitam apoiar a inovação, como as parcerias público-privadas com empresas nacionais e estrangeiras (como Oxiteno, Braskem, Dedini, ETH Bioenergia, BP Biofuels, Novozymes), consórcios (BE-Basic) e instituições de pesquisa internacionais.

Para ampliar e coordenar o apoio a tecnologias de segunda geração, o BNDES e o Finep lançaram em 2011 o Plano Conjunto de Apoio à Inovação Tecnológica Industrial dos Setores Sucroenergético e Sucroquímico (PAISS),<sup>24</sup> abrangendo instrumentos como empréstimos, subvenção e *equity/venture capital* das duas agências. O total de recursos a ser alocado no apoio a propostas entre 2012 e 2014 é de US\$ 570 milhões, alavancando investimentos totais de US\$ 1,7 bilhão [Milanez, Nyko e Cavalcanti (2010)]. Quase sessenta empresas responderam à chamada de projetos e 25 delas tiveram 35 planos de negócios selecionados – entre empresas químicas locais e globais, empresas de etanol e firmas de biotecnologia (algumas delas ranqueadas entre as principais empresas de bioenergia da *Biofuels Digest* e todas apoiadas pelo Programa de Biomassa do Departamento de Energia americano). Parcela majoritária dos planos de negócios objetiva o desenvolvimento de produtos químicos (e não biocombustíveis), contemplando dez acordos de pesquisa cooperativa entre universidades,

<sup>24</sup> Ver <[http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes\\_pt/Galerias/Arquivos/produtos/download/paiss\\_planos\\_selecionados.pdf](http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes_pt/Galerias/Arquivos/produtos/download/paiss_planos_selecionados.pdf)>. Acesso em: 16.12.2012.

instituições de pesquisa e empresas, sete consórcios empresariais, a construção de 12 plantas de demonstração (dois terços das quais destinados a produtos químicos) e sete plantas pré-comerciais (cinco para químicos) [Nyko (2012)]. Parcela majoritária das empresas com planos aprovados é constituída de estrangeiros (56%) e a maioria é composta por firmas de biotecnologia (36%), químicas (29%) ou do agronegócio (14%). Entre os parceiros nacionais, firmas químicas e do agronegócio se destacam, embora apenas uma empresa do setor sucroenergético nacional.

Apesar do aparente relativo desinteresse de grandes empresas químicas e principalmente de petróleo no PAISS, a maioria dessas empresas tem participação acionária ou acordos de cooperação no exterior com as *start-ups* de biotecnologia (como a participação da Total na Amyris, os acordos de cooperação para inovação no plano internacional entre as grandes petroleiras e químicas, como BP, ExxonMobil, Chevron, Petrobras e Basf com empresas de base biotecnológica). Isso significa uma participação “indireta” dessas empresas no PAISS, por meio das firmas de biotecnologia, partícipes diretas do Programa. Essas *start-ups* estão envolvidas ainda em intrincados vínculos com outras firmas de biotecnologia emergentes diretamente focadas na produção de açúcar, como no caso da LS9 com a HCL Cleantech, Amyris e Renmatix, Solazyme e Proterro, entre outras [Technology Review; Bomtempo (2011)].

No Brasil, o mercado de capitais não desempenha papel importante no desenvolvimento da indústria de bioetanol, em função da especificidade institucional *path dependent* do financiamento de longo prazo do país fortemente baseado no crédito [Zysman (1983)], em parte pela longa tradição de altas taxas de juros. Assim, a principal fonte de financiamento ao investimento, além de lucros retidos (que, em média, responderam por 47% das fontes de financiamento ao investimento entre 2000 e 2010), é o crédito bancário, sobretudo público, do BNDES (em média, 25%), com *equities/corporate bonds* respondendo por apenas 13,5%, em média, e o restante, por financiamento do exterior [BNDES (2011)]. O capital de risco é uma fonte pouco importante até mesmo para firmas de biotecnologia locais

(apenas 14% dessas firmas usam fundos de *venture capital*, das quais 5,1% delas de bioenergia), usualmente apoiando-se em fontes governamentais [Cebap/BR Biotec (2011)].

Nesse sentido, seja pela especificidade institucional do financiamento de longo prazo no país, seja pelas características da inovação, é central o apoio do governo à inovação em tecnologias limpas, particularmente marcadas por dupla externalidade. Apesar dos aperfeiçoamentos na década de 2000, os montantes dirigidos à inovação ainda são limitados e existem áreas não cobertas, notadamente P,D&D empresarial, que começa a ser atendida por PAISS, por seu caráter coordenado e otimizador dos recursos, mas que ainda requer o desenvolvimento de mecanismos novos, mais voltados para levar a inovação ao mercado e atrair investidores privados, como a subvenção direta à empresa para gastos de capital, além de alternativas como garantias de empréstimos, compras públicas e certificação/rotulagem em campanhas que estimulem também a demanda privada por esse tipo de produto.

O mecanismo de encomenda pública é incipiente no país, comparado ao amplo arcabouço americano, correspondendo a uma importante lacuna para a efetiva comercialização de tecnologias mais radicais, como as rotas da biotecnologia. A política industrial (PBM), lançada em 2011, buscou remover entraves de natureza legal e institucional, a exemplo do que foi promovido para o complexo da saúde no ano anterior, sendo esperado algum impacto positivo em etanol/biorrefinarias, principalmente compras da área da defesa.

O cenário emergente abre grandes oportunidades no sentido da produção no país de química com base em tecnologias de fronteira. No entanto, demandarão investimentos adicionais em produção de cana-de-açúcar, cujas projeções evidenciam déficit de oferta até 2020, apenas considerando o uso do etanol combustível (excluindo exportações e a demanda por química renovável), inclusive pelas modestas perspectivas de aumento de ganhos de eficiência do etanol convencional. Projeções do Departamento de Biocombustíveis do BNDES apontam para uma necessidade de investimentos agrícolas e industriais de R\$ 120-170 bilhões para adicionar entre 470 milhões

e seiscentos milhões de toneladas de capacidade de cana-de-açúcar de 2012 a 2020. Dado que um investimento típico em 2006-2009 adicionou anualmente uma média de 50 milhões de toneladas de cana,<sup>25</sup> a capacidade de adição nos próximos oito anos será de cerca de 400 milhões de toneladas, indicando um déficit potencial de oferta. Isso significa que, para atender apenas à demanda crescente por veículos *flex-fuel*, será necessário aumentar o investimento *greenfield*, a produtividade e a inovação no setor.

## Conclusões

Desde meados da primeira década dos anos 2000, o mundo tem enfatizado de forma crescente o uso e o desenvolvimento de tecnologias limpas, notadamente biocombustíveis. Ainda que os principais determinantes pareçam de natureza ambiental, vêm sendo crescentes os desafios econômicos relacionados aos altos e voláteis preços do petróleo e ao esgotamento de suas reservas e insuficiência de fontes de energia e matérias-primas de origem fóssil. Governos de países desenvolvidos têm tido papel central, principalmente depois da crise financeira, por meio de apoio direto e indireto a P,D&D e mesmo a plantas pré-comerciais, além de participação ativa também das economias emergentes.

Os mais notórios instrumentos das políticas e estratégias nacionais de biocombustíveis são, frequentemente, associados a regras mandatórias de seu uso e adição aos combustíveis fósseis. No entanto, mecanismos mais amplos vêm sendo desenvolvidos pelo governo americano com vistas ao apoio às biorrefinarias, com base em uma abordagem sistêmica da inovação orientada para o mercado. O apoio do Departamento de Energia somou US\$ 2,1 bilhões em 2000-2009 [DOE (2010)], dirigido a P,D&D e desenhado para financiar atividades típicas de P&D e promover inovações no mercado.

<sup>25</sup> A capacidade de cana-de-açúcar no Brasil saltou de 382 milhões de toneladas, na safra de 2005-2006, para 620 milhões de toneladas, na safra de 2010-2011, embora recuando no período recente, com 555 milhões de toneladas na última safra.



A despeito da base industrial, da capacitação tecnológica europeia e do alto montante de apoio dos governos e da União Europeia – estimado em US\$ 2,5 bilhões em 2007-2013 [Nyko *et al.* (2010)] – a região está bem atrás dos Estados Unidos no desenvolvimento de biorrefinarias, em virtude da natureza fragmentada da região, da menor presença de *start-ups* em biotecnologia industrial (*vis-à-vis* o modelo liberal), que seriam veículos de uma eventual nova revolução tecnológica, além da ausência de *funding* para atividades mais próximas do mercado e de sua viabilidade econômica, como plantas de demonstração.

Biorrefinarias, biocombustíveis e químicos *bio-based* podem dar lugar à próxima revolução tecnológica. Estimativas apontam que energia e químicos derivados da biomassa baseados em biotecnologia industrial alcancem uma fatia crescente do consumo mundial. O World Economic Forum de 2010 projetou em US\$ 295 bilhões a receita potencial para a cadeia de valor da biomassa até 2030. Contudo, seja pelo caráter de bem quase público dessas inovações, seja pela inadequação da biotecnologia industrial aplicada à energia ao modelo típico do capital de risco, os governos parecem ter papel decisivo no período de instalação do que pode ser a próxima revolução industrial, ao contrário das precedentes, em que esse papel ocorreu apenas na fase de operação/difusão.

Ainda que a política recente dos Estados Unidos tenha sofrido algum retrocesso em relação à prioridade e aos recursos antes destinados a biorrefinarias e ao uso da biomassa, em virtude dos desenvolvimentos recentes de tecnologia de extração do gás natural das amplas reservas de *shale gas* do país, ampliando as perspectivas de “segurança energética”, o cenário parece auspicioso para as economias emergentes: de um lado, pela crescente demanda por energia e matérias-primas nas economias emergentes; de outro, naquelas com vantagens naturais de matérias-primas, abrem-se avenidas para *catching up* ou mesmo inovação na fronteira tecnológica, com perspectivas de investimento, agregação de valor e mais densidade tecnológica, como na química.

No Brasil, o êxito do etanol combustível convencional e as vantagens comparativas da cana-de-açúcar qualificam o país a integrar-se

à corrida tecnológica do etanol de próxima geração, das biorrefinarias e, principalmente, da produção da química renovável com base na biomassa – uma vez que expressivo mercado doméstico vem sendo suprido de forma crescente por importações de química de fontes fósseis –, que poderão ser as bases da nova revolução tecnológica. São esses os motivos de atração e do crescente interesse de parceiros internacionais, sejam grandes *players* de energia, química ou agronegócios, sejam firmas *start-ups* de biotecnologia, ou mesmo instituições de pesquisas, em pesquisa colaborativa com parceiros locais e da internacionalização de atividades de P,D&D. Não bastasse isso, as usinas de etanol convencional já operam com a configuração de biorrefinarias, na medida em que produzem múltiplos produtos como etanol, açúcar e a geração de energia.

Lidar com esses novos arranjos exigirá o redesenho das políticas públicas, principalmente instrumentos de apoio financeiro, em que o papel do governo é suposto mais ativo do que preconizado por Perez (2004; 2010a) nos períodos de instalação das revoluções tecnológicas, e deverá ser ainda mais decisivo, seja pelo caráter mais internacionalizado da inovação, seja pela inexistência de instituições financeiras especiais no país capazes de lidar com as incertezas da inovação em biotecnologia ou mesmo por sua própria inadequação a investimentos em biotecnologia industrial em tecnologias limpas com caráter de bem quase público.

Nesse sentido, será necessário conjugar políticas de oferta e demanda, em especial apoio financeiro público em montantes mais amplos do que os atuais e livres da instabilidade dos mecanismos de *funding*, além da necessidade de aumentar a cobertura do conjunto de atividades de P,D&D, principalmente empresariais, e fortalecer mecanismos *demand-pull* com esquemas de encomendas públicas preferenciais que poderiam incluir, por exemplo, conteúdo *bio-based* ou “renovável” de compras por meio de programas dos governos federal, estadual e local. Mecanismos como “garantias de empréstimos” (apesar de erros como o caso Solyndra) deveriam ser explorados por seu papel de modificador da percepção de risco por agentes privados, como bancos, constituindo instrumento importante em sistemas de

financiamento de longo prazo baseados no crédito, atraindo, assim, bancos privados para o financiamento da inovação e de biorrefinarias. Por fim, o fundo social a ser constituído com recursos do petróleo da camada pré-sal deveria também alocar recursos em biorrefinarias e inovação em biocombustíveis e química renovável. A exploração de petróleo do pré-sal, além de objeções de natureza ambiental, parece constituir uma solução apenas de longo prazo para produtos químicos. O PAISS foi um importante mecanismo, que evidenciou as principais características da transição em curso, mas com recursos ainda limitados e necessidade de desenvolvimento de novos e mais adequados instrumentos financeiros.

## Referências

- ARORA, A.; GAMBARDILLA, A. *Implications for energy*. Cambridge: National Bureau of Economic Research (NBER), jan. 2010 (Working Paper 15676). Disponível em: <<http://www.nber.org/papers/w15676>>. Acesso em: 12 ago. 2011.
- BASTOS, V. D. Etanol, Alcoolquímica e Biorrefinarias, *BNDES Setorial*, n. 25, p. 5-38, Rio de Janeiro, BNDES, mar. 2007.
- \_\_\_\_\_. Desafios da Petroquímica Brasileira no Cenário Global. *BNDES Setorial*, n. 29, p. 321-358, Rio de Janeiro, BNDES, mar. 2009.
- \_\_\_\_\_. *Brazilian sugar cane green chemistry and ethanol fuel in the new geography of innovation of biotech's third wave. Abstract* aprovado na 20<sup>th</sup> European Biomass and Conference Exhibition, Milão, Itália, 18-22 jun. 2012a.
- \_\_\_\_\_. Technological revolutions and financing innovations: Brazilian opportunities and challenges in green chemistry. In: 14<sup>th</sup> ISS CONFERENCE, INTERNATIONAL SCHUMPETER SOCIETY, Brisbane, Austrália, 2-5 jul. 2012b.
- BASTOS, V. D.; COSTA, L. M. Balança Comercial e Potencial de Investimento na Indústria Química Brasileira. In: TORRES, E.; PUGA, F.; MEIRELLES, B. (Orgs.). *Perspectivas do Investimento 2010-2013*. Rio de Janeiro: BNDES, mar. 2010.
- BIOREFINING MAGAZINE, Getting funds flowing, 7 set. 2010.
- \_\_\_\_\_. 22 ago. 2011a.

\_\_\_\_\_. Transforming financial reform, bond financing is here – and all signs point to a perfect match, 20 mai. 2011b.

\_\_\_\_\_. Scaling up to biobased chemicals, 17 fev. 2011c.

BOMTEMPO, J. V. *The future of biofuels X: the two sugar rushes*, 21 nov. 2011. Blog infopetro. Disponível em: <<http://infopetro.wordpress.com/2011/11/21/the-future-of-biofuels-x-the-two-sugar-rushes/#more-3212>>. Acesso em: 23 mai. 2012.

BNDES – BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL. *Relatório do Investimento*. Rio de Janeiro, BNDES, nº 1, out. 2011. Disponível em: <[http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes\\_pt/Galerias/Arquivos/conhecimento/relatorio\\_investimentos/relatorio\\_investimento012011.pdf](http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes_pt/Galerias/Arquivos/conhecimento/relatorio_investimentos/relatorio_investimento012011.pdf)>. Acesso em: 28 mai. 2012.

BRUCHE, G. A new geography of innovation – China and India rising. *Columbia FDI Perspectives*, n. 4, 29 abr. 2009.

CEBRAP/BR BIOTEC. Brazil Biotech Map 2011, Brazilian Biotechnology Promotion Project, Fundação Bio-RIO/Apex Brasil, 2011.

CHEMSYSTEMS. *Bio-based chemicals: going commercial*. Nova York: Prospectus, jan. 2012.

CHU, S. *Winning the clean energy innovation race*. ARPA-E Energy Innovation Summit, National Harbor, MD, 1º mar. 2011.

DOE – US DEPARTMENT OF ENERGY. Biomass Multi-Year Program Plan, 2010.

\_\_\_\_\_. DOE, FY 2013 Congressional Budget Request, Budget Highlights, Office of Chief Financial Officer, fev. 2012.

DUTZ, M. A.; SHARMA, S. *Green growth, technology and innovation*. The World Bank/Poverty Reduction and Economic Management Network, jan. 2012 (Policy Research Working Paper 5932).

EDLER, J.; GEORGHIOU, L. Public procurement and innovation – Resurrecting the demand side. *Research Policy* 36, 2007, p. 949-963.

EPA – ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *Green chemistry*. United States Environmental Protection Agency, 2006. Disponível em: <<http://www.epa.gov/greenchemistry/>>. Acesso em: 20 abr. 2012.

FONSECA, M. G. D.; BASTOS, V. D. *Biotechnology in developed and developing countries: similarities and differences in entrepreneurship and funding*. In: INTERNATIONAL J. A. SCHUMPETER SOCIETY – ISS CONFERENCE, “Innovation, Competition and Growth: Schumpeterian Perspectives”, Nice, França, 21-24 jun. 2006.

- FREEMAN, C. The greening of technology and models of innovation. *Technological Forecasting and Social Change*, n. 53, p. 27-39, Elsevier Science Inc., Nova York, 1996.
- \_\_\_\_\_. *The economics of industrial innovation*. Londres: Penguin, 1974.
- FURTADO, A.; SCANDIFFIO, M. I. G.; CORTEZ, L. A. B. *Innovation system in the Brazilian sugarcane agro-industry*. In: IV GLOBELICS, MEXICO CITY, 22-24 set. 2008.
- GHOSH, S.; NANDA, R. *Venture Capital Investment in the Clean Energy Sector*, Harvard Business School Entrepreneurial Management, Working Paper Nº. 11-020, 1º ago. 2010.
- GOLDEMBERG, J. The Brazilian biofuels industry. *Biotechnology for Biofuels*, 1:7, 2008. Disponível em: <<http://www.biotechnologyforbiofuels.com/content/1/1/6>>. Acesso em: 27 jan. 2012
- IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. *Sustainable production on the second generation biofuels. Potential and perspectives in major economies and developing*, 2010.
- \_\_\_\_\_. IEA, biorefineries: adding value to the sustainable utilization of biomass. *IEA Bioenergy*, 2009.
- JENKINS, J. *et al. Beyond boom & bust: putting clean tech on a path to subsidy independence*, abr. 2012.
- LUNDVALL, B. (ed.). *National systems of innovation: towards a theory of innovation and interactive learning*. Londres: Pinters Publishers, 1992.
- MALERBA, F. (ed.). *Sectoral systems of innovation*. Cambridge: Cambridge University Press, p. 9-41, 2004.
- MAXIQUIM. Matérias-primas renováveis para a indústria química no Brasil: etanol. *Maxiquim Market Outlook Renováveis*, Porto Alegre, dez. 2010.
- MEISER, A. (McKINSEY & COMPANY). *Perspectives on the biofuel industry*. In: III RENEWABLE RESOURCES AND BIOREFINERIES CONFERENCE, Gent, 4-6 jun. 2007.
- MILANEZ, A., NYKO, D.; CAVALCANTI, C. E. Brazil's race towards second generation biofuels. *Biofuels International*, n. 5, v. 6, p. 34-35, jun. 2012. Disponível em: <<http://www.biofuels-news.com>>. Acesso em: 7 mar. 2012.
- NATURE. Next generation biofuels, v. 474, 23 jun. 2011.
- NELSON, R. (ed.). *National innovation system: a comparative analysis*. Nova York e Oxford: Oxford University Press, 1993.

NYKO, D. *A inovação como fator de competitividade no setor sucroenergético*. In: IV CONFERÊNCIA DE NOVAS TECNOLOGIAS EM BIOMASSA, SÃO PAULO, 15 mai. 2012.

NYKO, D. *et al.* A corrida tecnológica pelos biocombustíveis de segunda geração: uma perspectiva comparada. *BNDES Setorial*, n. 32, p. 5-48, Rio de Janeiro, BNDES, 2010.

OCDE – ORGANIZAÇÃO PARA A COOPERAÇÃO E DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO. *Policy responses to the economic crisis: investing in innovation for long-term growth*, 2009.

PEREZ, C. Finance and technical change: A long-term view. In: HANUSCH, H.; PYKA, A. (eds.). *The Elgar Companion to Neo-Schumpeterian Economics*. Cheltenham: Edward Elgar, 2004.

\_\_\_\_\_. *The financial crisis and the future of innovation: a view of technical change with the aid of history*. Working Papers in Technology Governance and Economic Dynamics, n. 28, fev. 2010a.

\_\_\_\_\_. Technological dynamism and social inclusion in Latin America: a resource-based production development strategy. *Cepal Review* 100, p. 121- 141, abr. 2010b.

\_\_\_\_\_. *The direction of Innovation after the financial collapse – ICT for green growth and global development*. In: IX TRIPLE HELIX CONFERENCE, Stanford, jul. 2011.

PWC – PRICE WATERHOUSECOOPERS. *Building strength*, Price WaterhouseCoopers, jan. 2012.

PWC/NVCA – PRICE WATERHOUSECOOPERS & NATIONAL VENTURE CAPITAL ASSOCIATION. *Money Tree Report*, com base em dados de Thomson Reuters, 2011.

SCHNEIDER, B. W. A capital market's view on industrial biotechnology – proper valuation is the key for picking the right investment opportunities in stormy times. *Journal of Business Chemistry*, 6 (3), p. 108-110, Institute of Business Administration, 2009

SILVA, A. C. R. *New perspectives for agricultural biotechnology in Brazil*. Campinas: Alellyx Applied Genomics, 2007.

UNEP – UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. *Global trends in renewable energy investment*. United Nations Environment Programme and Bloomberg New Energy Finance, 2011.

VILELLA FILHO, M. *et al.* Chemistry based on renewable raw materials: perspectives for sugar cane-based biorefinery. *Enzyme Research*, mar. 2011.

WILLIAMSON, K. The biofuel generation gap. *Renewable Energy Focus*, mai.-jun. 2011. Disponível em: <<http://www.renewableenergyfocususa.com/view/19291/the-biofuel-generation-gap/>>. Acesso em: 25 abr. 2012.

WONGSTCHOWSKI, P. *A indústria química: riscos e oportunidades*. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2002.

XAVIER, M. R. S. The Brazilian sugarcane ethanol experience. *Issue Analysis*, n. 3, Competitive Enterprise Institute (CEI), 15 fev. 2007.

ZYSMAN, J. *Governments, markets, and growth: financial systems and the politics of industrial growth*. Londres: Martin Robertson, 1982.

### **Sites consultados**

ABIQUIM – Associação Brasileira da Indústria Química – <<http://www.abiquim.org.br>>.

BIOFUELS DIGEST – <<http://www.biofueldigest.com>>.

BIO PREFERRED PROGRAM – <<http://www.biopreferred.gov>>.

MCTI – Ministério da Ciência e Tecnologia – <[www.mct.gov.br](http://www.mct.gov.br)>.

TECHNOLOGY REVIEW – <[www.technologyreview.com/magazine](http://www.technologyreview.com/magazine)>.

UNICA – Associação da Indústria de Cana-de-Açúcar – <<http://unica.com.br>>.